Министерство транспорта РФ
Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН
Южный научный центр РАН
Совет РАН по инновационным проблемам транспорта и логистики
Научный совет по машиностроению РАН
Межведомственный научный совет по трибологии РАН
Российский Союз научных и инженерных общественных объединений
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
ОО «Российская академия транспорта»
РРОО «Ассоциация выпускников РГУПС»

Международная научная конференция «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс−2021)

Сборник статей

9-10 ноября 2021 г.
г. Ростов-на-Дону

УДК 621.891: 531

Механика и трибология транспортных систем: сборник статей международной научной конференции,
Рост. гос. ун-т путей сообщения, Ростов н/Д, 2021, 398 с.

ISBN 978-5-907295-52-0

В сборник статей международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2021) вошли материалы по следующим направлениям:

- инновационное развитие транспортного комплекса Российской Федерации;
- механика транспортных систем;
- проблемы трения, износа, смазочных материалов и смазки;
- механика контактного взаимодействия;
- новые износостойкие материалы и упрочняющие технологии;
- методы и средства испытаний на трение и износ;
- экологические и экономические проблемы транспортных трибосистем.

ISBN 978-5-907295-52-0
© Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021

Ministry of Transport of the Russian Federation
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal Agency for Railway Transport
Department of Power Engineering, Mechanical Engineering, Mechanics and Control Processes
Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
RAS Council on Innovative Problems of Transport and Logistics
Scientific Council on Mechanical Engineering
Interdisciplinary Scientific Tribology Council
Russian Union of Scientific and Engineering Associations
Rostov State Transport University
Russian Academy of Transport
Association of graduates of RSTU

International Scientific Conference «Mechanics and tribology of transport systems» (MechTroboTrans −2021)

Collection of articles

November 9-10, 2021 г.
Rostov-on-Don

UDC 621.891: 531

Mechanics and tribology of transport systems: сборник статей международной научной конференции,
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, 2021, 398 p.

ISBN 978-5-907295-52-0

The collection of articles of the international scientific conference "Mechanics and tribology of transport systems" (MechTroboTrans -2021) includes materials in the following areas:

- Innovative development of the transport complex of Russian Federation.
- Mechanics of transport systems.
- The problems of friction, wear, lubricating materials and lubricants.
- The mechanics of contact interaction.
- The new wear-resistant materials and strengthening technologies.
- Methods and means of friction and wear tests.
- Environmental and economic problems of transport tribosystems.

ISBN 978-5-907295-52-0 © Rostov State Transport University, 2021

80 лет Колесникову Владимиру Ивановичу

Колесников Владимир Иванович крупный российский ученый, академик Российской академии наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат премии Президента Российской Федерации в области образования, президент РГУПС.

Колесников В.И – автор более 770 научных трудов, в том числе 18 монографий, более 70 изобретений и патентов. Сфера его научных интересов – транспорт, триботехника, нанотехнологии и создание новых полимерных материалов. Принципиально новый в трибологии вывод доказан Колесниковым В.И. о том, что трение может являться не только, как принято считать, разрушительным процессом, но и возможно реализовать его как процесс созидательный. Это показано на внедрении разработанной технологии повышения износостойкости фрикционных металло-полимерных трибосистем – «колесо – тормозная колодка» подвижного состава.

Колесников Владимир Иванович создал в университете научную школу трибологов мирового уровня по разработке новых композиционных и смазочных материалов для всех видов транспорта, машин и механизмов. Им подготовлены 12 докторов и 26 кандидатов наук. Его научные книги: «Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа» и «Тепловая задача металлополимерных трибосопряжений» широко известны в стране и за рубежом.

Научные результаты Колесникова В.И. соответствуют и опережают уровень мировых достижений в данной области науки. Особенно это продемонстрировано на разработке технологий высокоэнтропийных покрытий и материалов с эффектом памяти формы с применением методов цифрового синтеза, количественного анализа рентгеноспектральных данных, полученных на источниках синхронного излучения и методов машинного обучения, в том числе нейросетевых технологий.

Колесников В.И. является организатором научного центра инновационных технологий, оснащенного уникальной инновационной исследовательской аппаратурой, на базе которого осуществляются исследования по актуальным проблемам нанотехнологий, транспорта и экологии. В феврале 2021 года заявка Колесникова В.И. «Создание триботехнических материалов и покрытий нового поколения на основе интеллектуальной (цифровой) технологии синтеза» признана победителем открытого публичного конкурса на получение гранта Российского научного фонда на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований в 2021 – 2024 годах по мероприятию «Проведение исследований научными лабораториями мирового уровня в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными.

Фундаментальные исследования, проводимые под руководством В.И. Колесникова, ориентированы на предприятия транспортного комплекса страны и развитие инновационной деятельности в Ростовской области. Среди основных заказчиков научных работ – АО «Трансмашхолдинг», «Вертолеты России», «Росжелдор», компания ОАО «РЖД», ФГУП «ЦАГИ», крупные предприятия Ростовской области «Роствертол», Ростовский-на-Дону электровозоремонтный завод, Северо-Кавказская железная дорога и другие.

Под руководством и при непосредственном участии Колесникова В.И. введен в эксплуатацию участок по восстановлению моторо-осевых подшипников подвижного состава в локомотивном депо Северо-Кавказской дирекции по ремонту тягового подвижного состава ОАО «РЖД»; осуществлена широкая опытная проверка на заводе ПАО «Роствертол» разработанных технологий и новых материалов для формирования ионно-плазменных покрытий, работающих в шлицевом соединении хвостовой трансмиссии вертолета МИ-26М и получивших положительные результаты по повышению износостойкости и надежности работы данного сопряжения.

Колесниковым В.И. сделан крупный вклад в развитие теории и технологии производства металлополимерных трибосистем и разработку новых материалов и технологий вакуумных ионно-плазменных (PVD) и алмазоподобных (DLC) покрытий. Им предложен новый теоретический метод исследования пограничной области фрикционного контакта, базирующийся на теории регуляризации сингулярных возмущений, а также на основе метода неравновесной термодинамики и с помощью квантово-химических расчетов им разработана методология, критерии оценки и способ аттестации элементов трибосистемы по их совместимости путем определения энергии химической связи легирующих и примесных элементов, определяющих упрочняющие свойства этих элементов.

Колесников В.И. на высоком уровне организовал работу своих учеников по осуществлению широкого внедрения новых композиционных материалов с самым разнообразным их применением в различных узлах трения подъемно-транспортных, строительных машин, подвижного состава, авиации. Под его руководством на предприятии «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» в 2018 г. выполнена работа «Совершенствование действующего демпфера вибраций винтовых приборов (ВП-5, ВП-6) за счет инновационных вращательных пар трения для пилона фюзеляжа самолета МС-21», обеспечивающая высокий эксплуатационный ресурс и устойчивую длительную работу демпфера.

Для обеспечения безопасности работы тяжелонагруженных узлов трения машин, транспортных средств, механизмов, летательных аппаратов Колесниковым В.И. разработана и внедрена методика достоверного информирования о техническом состоянии этих систем за весь период их работы, прогнозирующего приработочный режим, остаточный ресурс, порог предупреждения и порог опасности.

Имя Колесникова В.И., как организатора науки и образования, широко известно в России и за рубежом, он является действительным членом Международной инженерной академии. В 1991 году избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, с 2003 года – академик РАН. Колесников Владимир Иванович – член Президиума Южного научного центра РАН, член бюро отделения Энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, председатель Совета Российской академии наук по инновационным проблемам транспорта и логистики, член Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», председатель двух научных советов по защите кандидатских и докторских диссертаций, главный редактор двух научных журналов, член редколлегии ряда российских и зарубежных журналов.

Колесников Владимир Иванович выполняет большую общественную работу, являясь членом Президиума Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки, членом совета Общественной палаты Ростовской области. Был депутатом Верховного Совета СССР и руководил комиссией по железнодорожному транспорту, избирался депутатом двух созывов Законодательного собрания Ростовской области (1998–2008).

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сычев А.П., Лавров И.В., Яковлев В.Б., Бардушкин А.В., Сычев А.А. Моделирование эксплуатационных упругих характеристик эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами 15
Горячева И.Г., Мещерякова А.Р. Моделирование контактно-усталостного разрушения упругих тел в условиях трения качения 21
Глазунов В.А., Албагачиев А.Ю., Шалюхин К.А., Скворцов С.А., Рашоян Г.В., Алешин А.К., Романов А.А. Разработка механизма параллельной структуры с зубчатыми зацеплениями и учетом сил трения в них 26
Мышкин Н.К., Григорьев А.Я. Актуальные проблемы трибологии 31
Броновец М.А. Открытый космос: проблемы трибологии и задачи испытаний 35
Буяновский И.А. Учению о граничной смазке 99 лет 41
Пустовой В.Н., Лакин И.И. Методы управления качеством эксплуатации локомотивов в АО «Трансмашхолдинг» 48

СЕКЦИЯ 1.
Инновационное развитие транспортного комплекса Российской Федерации

Алабина В.В. Перспективы развития цифровой транформации транспортно-складских комплексов 54
Войнов К.Н., Трофимов Е.С. Проблемы и решения транспортной безопасности 58
Задорожний В.М., Бакалов М.В., Шляпников С.В. Моделирование параметров распределения грузо- и вагонопотоков в условиях мультиагентности транспортного комплекса 63
Кашарина Т.П., Кашарин Д.Д. Новые пути развития транспортного комплекса России с применением композитных материалов 67
Лакин И.К. Особенности применения основных понятий надёжности в условиях сервисного обслуживания локомотивов 72
Лябах Н.Н., Бакалов М.В. Управление исследованиями и разработками на основе теории активных систем (на примере организации трибологических исследований) 76
Лябах Н.Н., Колесников М.В., Бакалов М.В., Шаповалова Ю.В. Применение теории активных систем для формализации процесса разработки и внедрения инноваций на транспорте 80
Мизгирева Е.Е. Проблемы и перспективы развития транспортных узлов крупных городских агломераций 85
Поярков М.П. Перспектива развития пассажирских перевозок 89
Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Воробьев А.В. Экспериментальные исследования плотности рассеиваемой энергии на этапе эксплуатации участка автомобильной дороги 93
Ченцов А.Г., Ченцов А.А., Сесекин А.Н. К вопросу о применении задачи маршрутизации «на узкие места» для оценивания возможностей посещения системы пунктов при ресурсном ограничении на каждое перемещение 100
Черняев С.С., Сироткин В.В. Технико-экономическое обоснование внедрения ветроэнергетической установки на электрифицированных участках железных дорог постоянного тока с благоприятными ветровыми условиями 104

СЕКЦИЯ 2.
Механика транспортных систем

Бородай А.В., Скринников Е.В. О трении тел как факторе движения 111
Веригин О.С., Зарифьян А.А., Талахадзе Н.В. Анализ надежности фрикционных соединений элементов колесной пары электровоза под влиянием электромеханических процессов в тяговом приводе..... 117
Приходько А.А. Кинетостатика односателлитного планетарного механизма прерывистого движения в составе привода ленточного конвейера..... 124
Рудиков Д.А. Синтез двухсвязанных множительных структур металлорежущих станков..... 130
Свечников А.А. Актуальные направления снижения вибрации в транспортных машинах 136
Сироткин В.В., Пигалев Д.А., Колмыкова М.Ю. Компьютерная модель для определения дополнительных потерь в крайних витках обмотки статора вентильно-индукторного двигателя 141
Субботина Н.Н., Крупенников Е.А. К решению задачи идентификации параметров вариационными методами..... 146
Фаталиев В.М., Мамедов Э.А. Ракетный редуктор на базе двух не вращающихся осей 152
Черных В.Н., Бойко А.В. Анализ адгезирующих свойств контактной сети переменного тока 157
Шаповалов В.В., Буракова М.А., Харламов П.В., Саямова Т.Л., Корниенко Р.А., Мищиненко В.Б. Совершенствование и развитие технологии контактно-ротапринтной лубрикации системы «колесо-рельс» 160
Шаповалов В.В., Саямова Т.Л., Рябыш Д.А., Мищиненко В.Б., Коваленко О.И. Повышение эффективности закрытых узлов трения..... 166

СЕКЦИЯ 3.
Проблемы трения, износа и смазочных материалов

Vélez J.C., Carlos Cornelio J.A., Buitrago-Sierra R., Santa J.F., Hoyos-Palacio L.M., Rudas J.S., Toro A., Nevshupa R. Development and characterization of composite friction nanomodifiers for a wheel-rail contact..... 171
Бойко М.В., Колесников И.В., Ермаков С.Ф., Бичеров А.А. Повышение триботехнических свойств смазочных материалов жидкокристаллическими присадками..... 177
Бойко М.В., Колесников И.В., Ермаков С.Ф., Бичеров А.А., Бойко Т.Г. Формирование граничных смазывающих слоев в синтетическом масле в присутствии этаноламинов и эфиров холестерина 181
Буракова М.А., Шаповалов В.В., Саямова Т.Л., Мищиненко В.Б. Разработка и совершенствование технологии контактно-ротопринтной лубрикации фрикционной системы «гребень колеса локомотива-рельс» 186
Майба И.А. Повышение ресурса жизненного цикла колесной пары локомотива 192
Маленко П.И., Релмасира К.Д., Леонов А.Ю. Моделирование процессов зарождения и роста трещин и пор во вторичных структурах поверхностной зоны трения 196
Мигаль Ю.Ф., Шаповалов В.В., Рябыш Д.А., Буракова М.А. Теоретические основы металлоплакирования тяжелонагруженных узлов трения в жидкой среде..... 202
Морозов А.В. Влияние размеров ямочной текстуры поверхности фанеры на ее сцепные свойства в сухих и влажных условиях трения..... 207
Наумов А.Г., Сырбу С.А. Развитие теории радикально-цепного механизма применительно к процессам лезвийного резания материалов..... 212

Наумов А.Г., Комельков В.А., Колбашов М.А. Применение магнитных микрокапсул в качестве СОТС при резании материалов 220
Парфенов А.С., Березина Е.В., Скобелева Н.С., Волков А.В., Годлевский В.А. Механизм абразивного износа в присутствии наноразмерной присадки..... 227
Плахотникова М.А., Лысянникова Н.Н. Исследование авиационных масел на термоокислительную стабильность 231
Самусенко В.Д., Буяновский И.А., Хрущов М.М. Влияние гидрогенизированных алмазоподобных углеродных покрытий, легированных элементами подгруппы хрома периодической системы на смазочные свойства модельных масел 237
Семин Н.С., Больших И.В., Мантуров Д.С. Методы повышения надежности работы трибоузлов экипажной части подвижного состава..... 243
Фетисов А.С. Мехатронный подшипник скольжения, смазываемый магнитореологической жидкостью 247
Шилов М.А., Волков А.В., Кузьмичева М.Д., Усольцева Н.В. Модель сдвигового течения пластичного смазочного материала с присадками углеродных наноструктур..... 253

СЕКЦИЯ 4.
Механика контактного взаимодействия

Буракова М.А., Шаповалов В.В., Фейзов Э.Э., Мищиненко В.Б., Корниенко Р.А. Модельная оптимизация динамически нагруженных нелинейных технических систем 258
Гаврилов К.В., Дойкин А.А., Рождественский Ю.В. Влияние параметров микротекстурирования поверхностей трения на работоспособность трибосопряжения «поршень-цилиндр» дизеля 262
Иваночкин П.Г., Беляк О.А, Мантуров Д.С., Данильченко С.А., Азоян А.И., Аникина Е.Д. Модифицированные полимерные композиционные материалы на основе эпоксифинольных смол и определение упруго-прочностных и трибологических свойств 266
Колесников В.И., Беляк О.А., Суворова Т.В. Вибрация штампа на слоистом гетерогенном основании при учете трения в области контакта..... 271
Махутов Н.А., Гаденин М.М., Резников Д.О. Деформации и разрушение при сочетании контактных и неконтактных взаимодействий 275
Неверов А.Н. Резьбовое соединение ультразвуковых волноводов..... 281
Ушаков В.Н., Лебедев П.Д., Ершов А.А., Ушаков А.В. О некоторых задачах управления и дифференциальных игр 287
Харламов П.В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования 294
Шевченко В.Я., Сильников М.В., Гук И.В., Михайлин А.И., Перевислов С.Н., Сильников Н.М. Механика композита алмаз-карбид кремния на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии при высокоэнергетических импульсных воздействиях..... 300

СЕКЦИЯ 5.
Новые износостойкие материалы и упрочняющие технологии

Быкова А.Д., Седакова Е.Б. Модифицирование рабочих поверхностей деталей узлов трения двухслойным износостойким Al-Al_2O_3 покрытием..... 306
Глазунов В.А., Албагачиев А.Ю. Аналитические модели тепловых процессов и внутренних напряжений при сварке трением с перемешиванием 312

Кохановский В.А., Нихотина Н.В. Приработка фторопластсодаржащих антифрикционных полимерных покрытий при возвратно-поступательном движении 317
Кармазина Л.А., Кротов В.Н., Меньших С.М. Связь структуры термообработанных сталей бандажей колес тягового подвижного состава с их износостойкостью 321
Мантуров Д.С., Данильченко С.А., Михайловская М.Д., Азоян А.И., Аникина Е.Д. Исследование модификации поверхности углеродистых сталей комбинированным методом 326
Муканов С.К., Петржик М.И., Кудряшов А.Е., Левашов Е.А. Повышение износостойкости путем электроискровой обработки СЭЛС сплава ВТ6 аморфным электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ 332
Наконечная К.В., Елагина О.Ю. Оценка долговечности внутренних покрытий промысловых трубопроводов под воздействием абразива 336
Памфилов Е.А., Капустин В.В. Новые антифрикционные композиты на основе искусственных и растительных полимеров 341
Панин С.В., Бяков А.В., Алексенко В.О. Формирование слоистых композитов на основе ПЭЭК с помощью станка для ультразвуковой сварки 345
Почес Н.С., Малышев В.Н. Исследование триботехнических характеристик МДО-покрытий сформированных в слабощелочных электролитах с добавлением различных компонентов 350
Сидашов А.В., Козаков А.Т., Яресько С.И., Михайловская М.Д. Сегрегационные процессы на поверхности инструментальных сталей после обработки 355
Христофорова Р.Е., Лазарева Н.Н., Васильев А.П. Разработка износостойких полимерных композиционных материалов на основе ПТФЭ модифицированных одностенными унт и каолином 359
Чернильник А.А. Типы и влияние структурной неоднородности бетона на его свойства 364

СЕКЦИЯ 6.
Методы и средства испытаний на трение и износ

Захаров А.Д., Лещев К.А., Veeregowda Deepak H., Alemanno Fabio Исследование сцепления при сверхнизком коэффициенте скольжения с использованием трибометра DUCOM Twin Disc (диск-диск) 370
Прожега М.В., Рещиков Е.О., Чернышов С.В. Разработка серии стендов «Триботест» для трибологических испытаний в соответствии с международными стандартами 375

СЕКЦИЯ 7.
Экологические и экономические проблемы транспортных трибосистем

Соловьев В.В., Соколов А.В., Маркелов А.В., Ермаков М.С. Экологические и экономические проблемы получения и использования смазочных материалов на основе жиров растительного и животного происхождения 381
Тагирова Д.Р. Анализ паводковых явлений вблизи искусственных сооружений и способы их мониторинга 389
Тищенко С.В. Экономические проблемы развития и функционирования энергетических систем 394

CONTENS

PLENARY REPORTS

Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Sychev A.P., Lavrov I.V., Yakovlev V.B., Bardushkin A.V., Sychev A.A. Modeling of operational elastic characteristics of epoxy compositions with hollow glass microspheres 15
Goryacheva I.G., Meshcheryakova A.R. Models of contact fatigue damage of elastic bodies under rolling friction 21
Glazunov V.A., Albagachiev A.Yu., Shalyukhin K.A., Skvortsov S.A., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Romanov A.A. Development of a parallel mechanism with gears considering the friction forces between them 26
Myshkin N.K., Grigoriev A.Ya. Actual problems of tribology 31
Bronovets M.A. Open space: tribology problems and test tasks 35
Buyanovskii I.A. The boundary lubrication science turns 99 41
Pustovoy V.N., Lakin I.I. Methods of locomotive operation quality management in Transmashholding 48

SECTION 1.
Innovative development of the transport complex of Russian Federation

Alabina V.V. Prospects for the development of digital transformation transportation and warehouse complexes 54
Voinov K.N., Trofimov E.S. Problems and solutions of transport security 58
Zadorozhniy V.M., Bakalov M.V., Shlyapnikov S.V. Modeling of parameters of distribution of freight and wagon flows in conditions of multi-agency of a transportation complex 63
Kasharina T.P., Kasharin D.D. New ways of development of the transportation complex of russia using composite materials 67
Lakin I.K. Features of reliability basic concepts application in the locomotives service maintenance conditions 72
Lyabakh N.N., Bakalov M.V. Research and development management based on the theory of active systems (on the example of the organization of tribological research) 76
Lyabakh N.N., Kolesnikov M.V., Bakalov M.V., Shapovalova Yu.V. Application of the theory of active systems to formalize the process of development and implementation of innovations in transport 80
Mizgireva E.E. Problems and prospects of development of transport hubs of large urban agglomerations 85
Poyarkov M.P. Prospects for the development of passenger transportation 89
Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Vorobev A.V. Experimental research of the density of dissipated energy at the stage of operation of the road 93
Chentsov A.G., Chentsov A.A., Sesekin A.N. On the application of the routing problem "to bottlenecks" to assess the possibilities of visiting a system of points with a resource restriction on each movement 100
Chernyaev S.S., Sirotkin V.V. Technical and economic assessment for implementation of a wind power plant on dc railways areas with favorable wind conditions 104

SECTION 2.
Mechanics of transport systems

Borodai A.V., Skrinnikov E.V. On the mechanism of fricnion of solids as a factor of motion 111
Veriguin O.S., Zarifyan A.A., Talahadze N.V. Analysis of the wheel set's frictional connections reliability of an electric locomotive under the influence of electromechanical processes in the traction drive 117
Prikhodko A.A. Kinetostatics of a single-satellite interrmittent motion planetary mechanism in a belt conveyor drive 124
Rudikov D.A. Synthesis of two-winged multiple structures of metal cutting machines 130
Svechnikov A.A. Current directions of vibration reduction in vehicles..... 136
Sirotkin V.V., Pigalev D.A., Kolmykova M.Yu. Computer model for calculation of supplementary losses in the end winding turns of the stator of the switched reluctance motor 141
Subbotina N.N., Krupennikov E.A. Variational approach to solving parameters identification problems..... 146
Fataliev V.M., Mammadov E.A. Batch gearbox based on two non-rotating axes..... 152
Chernykh V.N., Boyko A.V. Analysis of the adhesive devices of the ac contact network..... 157
Shapovalov V.V., Burakova M.A., Kharlamov P.V., Sayamova T.L., Kornienko R.A., Mishchenko V.B. Improvement and development of the technology of contact-rotaprint lubrication of the wheel-rail system..... 160
Shapovalov V.V., Sayamova T.L., Ryabykh D.A., Mishchenko V.B., Kovalenko O.I. Improving the efficiency of closed friction units..... 166

SECTION 3.
The problems of friction, wear, lubricating materials and lubricants

Vélez J.C., Carlos Cornelio J.A., Buitrago-Sierra R., Santa J.F., Hoyos-Palacio L.M., Rudas J.S., Toro A., Nevshupa R. Development and characterization of composite friction nanomodifiers for a wheel-rail contact..... 171
Boiko M.V., Kolesnikov I.V., Ermakov S.F., Bicherov A.A. Improving tribotechnical properties of lubricants with liquid crystal additives 177
Boiko M.V., Kolesnikov I.V., Ermakov S.F., Bicherov A.A., Boiko T.G. Formation of boundary lubricating layers in synthetic oil in the presence of ethanolamines and cholesterol esters..... 181
Burakova M.A., Shapovalov V.V., Sayamova T.L., Mishchenko V.B. Development and improvement of the technology of contact-rotoprint lubrication of the friction system “locomotive wheel crest-rail” 186
Mayba I.A. Increasing the life cycle resource of a locomotive wheelset 192
Malenko P.I., Relmasira C.J., Leonov A.Yu. Modeling of the processes of nucliation and growth of cracks and pores in secondary structures of the surface friction zone..... 196
Migal Yu.F., Shapovalov V.V., Ryabysh D.A., Burakova M.A. Theoretical foundations of metal plating of heavily loaded friction units in a liquid medium 202
Morozov A.V. The influence of the dimensions of the dimpled texture of the plywood surface on its coupling properties in dry and wet friction conditions 207
Naumov A.G., Syrbu S.A.Development of the theory of the radical chain mechanism applied to blade cutting processes materials 212

Naumov A.G., Komelkov V.A., Kolbashov M.A. Application of magnetic microcapsules as a cutting fluid with cutting of metal 220
Parfenov A.S., Berezina E.V., Skobeleva N.S., Volkov A.V., Godlevskiy V.A. Mechanism of abrasive wear in the presence of a nanoscale additive 227
Plakhotnikova M.A., Lysannikova N.N. Investigation of aviation oils for thermal and oxidative stability 231
Samusenko V.D., Buyanovsky I.A., Khrushchov M.M. The effect of hydrogenated diamondlike carbon coatings doped with elements of the chromium subgroup of the periodic system on the lubricating properties of model oils 237
Semin N.S., Bolshikh I.V., Manturov D.S., Morozova E.P. Methods of increasing the reliability of the work of the tribo-nodes of the crew part of the rolling stock 243
Fetisov A.S. Mechatronic journal bearing lubricated with magnetorheological fluid 247
Shilov M.A., Volkov A.V., Kuzmicheva M.D., Usol'tseva N.V. Model of shear flow of plastic lubricant with carbon nanostructures additives 253

SECTION 4.
The mechanics of contact interaction

Burakova M.A., Shapovalov V.V., Feizov E.E., Mishchenko V.B., Kornienko R.A. Model optimization of dynamically loaded nonlinear technical systems 258
Gavrilov K.V., Doikin A.A., Rozhdestvensky Yu.V. Influence of the parameters of microtexturing of friction surfaces on the performance of the piston-cylinder tribo-coupling of diesel 262
Ivanochkin P.G., Belyak O.A., Manturov D.S., Danilchenko S.A., Azoyan A.I., Anikina E.D. Modified polymer composite materials based on epoxyphinol resins and determination of elastic-strength and tribological properties 266
Kolesnikov V.I., Belyak O.A., Suvorova T.V. Vibration of a punch on a layered heterogeneous substrate with account for friction in the area of a contact 271
Makhutov N.A., Gadenin M.M., Reznikov D.O. Deformations and destruction with a combination of contact and non-contact interactions 275
Neverov A.N. Threaded connection of ultrasonic waveguides 281
Ushakov V.N., Lebedev P.D., Ershov A.A., Ushakov A.V. On some problems of control and differential games 287
Kharlamov P.V. Study of formation of secondary structures of frictional transfer on surface of steel samples in implementation of metal-plating technology 294
Shevchenko V.Ya., Silnikov M.V., Guk I.V., Mikhaylin A.I., Perevislov S.N., Silnikov N.M. Composite organoceramic panels based on diamond-silicon carbide ceramics with an adjustable interconnected structure for protection against bullets of 7.62 mm and 5.45 mm caliber with a hardened steel core 300

SECTION 5.
The new wear-resistant materials and strengthening technologies

Bykova A.D., Sedakova E.B. Modifying of working surfaces of friction components by two-layer wear-resistant Al-Al_2O_3 coating 306
Glazunov V.A., Albagachiev A.Yu., Shalyukhin K.A., Skvortsov S.A., Rashoyan G. V., Aleshin A.K., Romanov A.A. Development of a parallel mechanism with gears considering the friction forces between them 312

Kokhanovskii V.A., Nihotina N.V. Earnings of fluoroplastic-containing antifriction polymer coatings in reciprocating motion 317
Karmazina L.A., Krotov V.N., Menshikh S.M. The relationship of the structure of heat-treated steels of traction rolling stock wheel bands with their wear resistance 321
Manturov D.S., Danilchenko S.A., Mikhailovskaya M.D., Azoyan A.I., Anikina E.D. Investigation of surface modification of carbon steels by the combined method 326
Mukanov S.K., Petrzhik M.I., Kudryashov A.E., Levashov E.A. Improving the wear resistance by electric spark treatment of ebm alloy VT6 WITH $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ amorphous electrode 332
Nakonechnaya K.V., Elagina O.Yu. Estimation of the durability of internal coatings of fishing pipelines under the influence of abrasive 336
Pamfilov E.A., Kapustin V.V. New antifriction composites based on artificial and plant polymers 341
Panin S.V., Byakov A.V., Alexenko V.O. Fabrication of PEEK-based layered composites with ultrasonic welding machine 345
Poches N.S., Malyshev V.N. Study of mao-coatings tribotechnical characteristics formed in weakly alkaline electrolytes with addition of various components 350
Sidashov A.V., Kozakov A.T., Yaresko S.I., Mikhailovskaya M.D. Segregation processes on the surface of tool steels after processing 355
Khristoforova R.E., Lazareva N.N., Vasiliev A.P. Development of abrasive resistant polymer composite materials based on PTFE modified with single-wall CNT and KAOLIN 359
Chernil'nik A.A. Types and influence of structural inhomogeneity of concrete on its properties 364

SECTION 6.
Methods and means of friction and wear tests

Zakharov A.D., Leshev K.A., Veeregowda D.H., F. Alemanno Investigation of adhesion at an ultra-low slip coefficient using a DUCOM Twin Disc tribometer (disc-disc) 370
Prozhega M.V., Rechikov E.O., Chernyshov S.V. Development of a series of stands "Tribotest" for tribological tests in accordance with international standards 375

SECTION 7.
Environmental and economic problems of transport tribosystems

Soloviev V.V., Sokolov A.V., Markelov A.V., Ermakov M.S. Environmental and economic problems of producing and using grease-based lubricants of vegetable and animal origin 381
Tagirova D.R. Analysis of flood events near artificial structures and methods of their monitoring 389
Tishchenko S.V. Economic problems of development and functioning of energy systems 394

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 539.3 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_15

В.И. Колесников, академик РАН (Ростовский государственный университет путей сообщения), **В.В. Бардушкин,** д-р физ.-мат. наук (Национальный исследовательский университет «МИЭТ»), **А.П. Сычев,** канд. физ.-мат. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения, Федеральный исследовательский центр ЮНЦ РАН), **И.В. Лавров,** канд. физ.-мат. наук (Национальный исследовательский университет «МИЭТ»), **В.Б. Яковлев,** д-р физ.-мат. наук (Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН), **А.В. Бардушкин** (Национальный исследовательский университет «МИЭТ», ООО «Альфачип), **А.А. Сычев,** канд. техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ПОЛЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ МИКРОСФЕРАМИ

Аннотация. *Решается задача построения модели прогнозирования эксплуатационных упругих характеристик – модуля Юнга и коэффициента Пуассона – эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами (синтактиков). Модель опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей (в варианте метода самосогласования) и позволяет учитывать состав, объемные концентрации компонентов синтактиков и характерный размер микросфер (отношение толщины оболочки к радиусу полости). Для синтактных материалов на основе смолы УП-610 с полыми микросферами из бесщелочного стекла проведены численные модельные расчеты значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона, учитывающие изменение характерного размера и процентного объемного содержания микросфер.*

The problem of constructing a model for predicting the operational elastic characteristics – Young's modulus and Poisson's ratio – of epoxy compositions with hollow glass microspheres (syntactics) is solved. The model is based on the generalized singular approximation of the random fields theory (in the version of the self-consistency method) and allows considering the composition, volume concentrations of syntactic components, and the characteristic size of microspheres (the ratio of the shell thickness to the cavity radius). For syntactic materials based on UP-610 epoxy binder with hollow microspheres made of E-glass, numerical model calculations of the values of Young's modulus and Poisson's ratio were carried out, which consider the change in the characteristic size and percentage of the volumetric content of microspheres.

Ключевые слова: моделирование, эксплуатационные упругие характеристики, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, синтактик, микросфера, эпоксидное связующее.
Keywords: modeling, operational elastic characteristics, Young's modulus, Poisson's ratio, syntactic, microsphere, epoxy binder.

Полимерные композиции, основным наполнителем которых являются полые микросферы, называемые также сферопластиками (или синтактиками), находят широкое применение в авиа-, автомобиле- и судостроении, нефтяной, электронной промышленности и других областях науки и техники. Для полимерной основы синтактиков часто используются эпоксидные, фенолоформальдегидные или кремнийорганические связующие, а в качестве наполнителя – полые стеклянные микросферы. Хорошая адгезия полых стеклянных микросфер к полимерным связующим позволяет создавать структуры с низкой плотностью и широким спектром физико-механических характеристик [1–4].

Настоящая работа посвящена разработке метода прогнозирования и проведению численного моделирования эксплуатационных (эффективных) упругих характеристик эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами с учетом их объемного содержания в материале и характерного размера (отношение толщины оболочки микросферы к радиусу ее полости).

Эффективные упругие свойства неоднородных структур, обозначаемые символом «*», определяются тензором модулей упругости c^*, связывающим средние значения напряжений $\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle$ и деформаций $\langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$ в материале:

$$\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle = c^*_{ijkl} \langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle, \quad i,j,k,l = 1,2,3. \tag{1}$$

В формуле (1) $\mathbf{r}$ – радиус-вектор случайной точки в неоднородном материале, угловые скобки указывают на то, что выполняется процедура статистического усреднения [5].

Для проведения моделирования эффективных упругих свойств неоднородных материалов, позволяющего учитывать взаимодействие элементов неоднородности, состав, форму, ориентацию и концентрацию компонентов, в настоящей работе применяется обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей (ОСП) [5]. Тогда формула для вычисления тензора c^* имеет следующий вид (индексы опущены):

$$c^* = \left\langle c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle \left\langle (I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle^{-1}. \tag{2}$$

В формуле (2) $c(\mathbf{r})$ – тензор модулей упругости отдельного элемента неоднородности композита; $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^{\mathrm{c}}$, где c^{c} – специально вводимый в рамках ОСП тензор модулей упругости однородного тела сравнения; I – единичный тензор четвертого ранга; $g(\mathbf{r})$ – сингулярная составляющая второй производной тензора Грина уравнений равновесия [5].

Рассматриваемые в работе сферопластики представляют собой полимерные композиции на основе эпоксидной смолы УП-610 с полыми микросферами из бесщелочного стекла. Учет влияния на эксплуатационные упругие характеристики синтактных материалов геометрических размеров микросфер требует значительного усложнения расчетной модели. В разработанной модели расчеты выполняются в два этапа.

На 1-м этапе, опираясь на ОСП, по соотношению (2) вычисляются эффективные модули упругости пористого материала, состоящего из сферических пустот среднего радиуса R в матрице из бесщелочного стекла. Проведенные расчеты дают эффективные модули упругости неоднородного материала, из которого затем «вырезаются» шарикообразные включения, имитирующие полые стеклянные микросферы. Эти «вырезанные» микросферы затем «погружаются» в полимерную матрицу УП-610. Выполнение первого этапа позволяет учитывать характерный геометрический размер «вырезанных» микросфер (отношение толщины оболочки микросферы к радиусу ее полости).

На 2-м этапе, опираясь на ОСП, по соотношению (2) проводится численное моделирование эффективных упругих характеристик двухкомпонентной матричной композитной структуры, матрицей в которой служит эпоксидная смола марки УП-610, а наполнителем – «вырезанные» шарообразные включения, соответствующие полым стеклянным микросферам с модулями упругости, найденными на 1-м этапе.

Опишем более подробно основные пункты 1-го этапа метода моделирования. Как указывалось, рассматривается статистически однородная двухфазная матричная композитная среда (матрица – бесщелочное стекло, служащее материалом стенок микросфер), в котором случайным образом расположены включения, представляющие собой заполненные воздухом сферические пустоты среднего радиуса R. В силу статистической однородности рассматриваемой пористой среды можно определить среднее расстояние между шарообразными полостями и связать его с объемной концентрацией пор. Для этого можно рассмотреть так называемую тетраэдрическую укладку микросфер и выделить в ней

элементарный объем в виде трех касающихся друг друга полых шаров среднего радиуса $R+h_1$. В этом случае расстояние между центрами микросфер будет равно $2(R+h_1)$ (рис. 1). Однако при такой тетраэдрической укладке в пространстве между соприкасающимися полыми микросферами образуются пустоты. Поэтому за характерную толщину h стенок микросфер в настоящей работе бралось значение большее, чем h_1, а именно:

$$h=\frac{h_1+h_2}{2},$$

где $h_2=\frac{(2-\sqrt{3})R+2h_1}{\sqrt{3}}$, а величина h_2 соответствует случаю, когда поверхности всех трех полых шаров радиуса $R+h_2$ проходят через центр равностороннего треугольника со стороной $2(R+h_1)$ (вершинами треугольника служат центры соприкасающихся полых шаров среднего радиуса $R+h_1$).

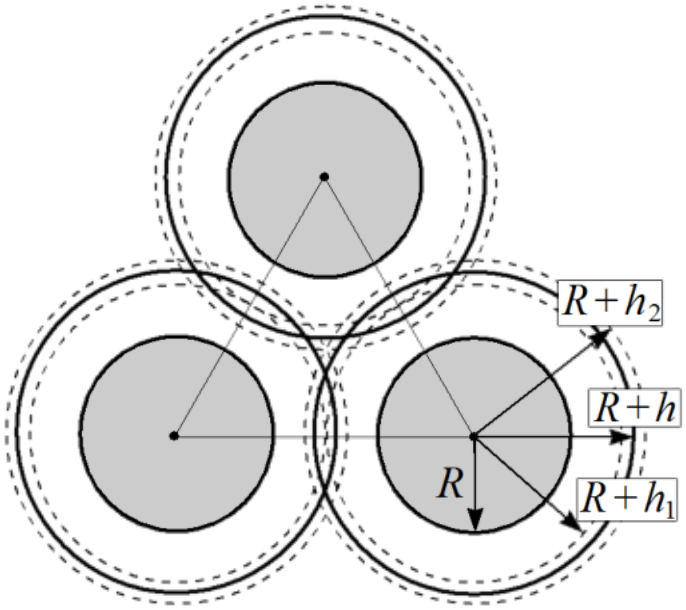


Рис. 1. Модель первого этапа прогнозирования эксплуатационных упругих характеристик синтактных материалов

Далее, установив характерную толщину h стенок микросфер, можно естественным образом ввести безразмерный микроструктурный параметр h/R и установить его связь с объемным содержанием пор $v_{\text{п}}$ (или объемным содержанием оболочки $v_{\text{об}}$). Для этого следует составить и решить следующую систему уравнений:

$$v_{\text{п}}+v_{\text{об}}=1,\quad \frac{v_{\text{об}}}{v_{\text{п}}}=\frac{\left(4\pi(R+h)^3/3\right)-\left(4\pi R^3/3\right)}{4\pi R^3/3}=\left(1+\frac{h}{R}\right)^3-1.$$

Отсюда объемная концентрация пор $v_{\text{п}}$ выражается через характерный размер h/R с помощью следующей формулы: $v_{\text{п}}=\left(1+\frac{h}{R}\right)^{-3}$. И наоборот, характерный размер h/R связан с объемной концентрацией пор $v_{\text{п}}$ с помощью соотношения

$$\frac{h}{R}=\frac{1}{\sqrt[3]{v_{\text{п}}}}-1. \qquad (3)$$

Диаметр стеклянных микросфер, как указывается в работах [1,6], обычно варьируется в пределах от 20 до 160 мкм, при этом толщина оболочки составляет величину, не превосходящую 2 мкм. Поэтому для образцов микросфер при проведении численного моделирования можно считать, что безразмерный параметр h/R может изменяться в пределах от 0.014 до 0.052 [6].

В настоящей работе все численные расчеты с тензорами на обоих этапах моделирования выполнялись в матричной форме [5]. Для нахождения значений ненулевых элементов симметрических матриц тензора модулей упругости для каждого из изотропных компонентов синтактиков использовались следующие данные об их упругих характеристиках [7–9]:

– воздух: объемный модуль – $1.21\cdot10^{-4}$ ГПа, сдвиговый модуль – 0 ГПа;
– бесщелочное стекло: модуль Юнга – 76.2 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.22;
– связующее УП-610: модуль Юнга – 5.2 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.41.

На первом этапе моделирования при вычислениях по формуле (2) тензора c^* a = h/Rприменялся дифференциальный метод самосогласования [10]. Идея этого метода состоит в пошаговом добавлении малыми порциями включений в виде сферических пор в эквивалентную (эффективную) среду, образованную матрицей УП-610 и всеми сферическими порами, внедренными на предыдущих шагах. Для вычисления эффективных упругих характеристик каждой из вновь образованных на очередном шаге неоднородных сред (с добавленной порцией пор) применялся метод самосогласования [5,11].

В настоящей работе включения в виде сферических пор добавлялись 5 %-ми (по объему) порциями в полученную на предыдущем шаге эквивалентную неоднородную среду. Затем на каждом шаге, зная для указанной среды объемную долю пор $v_{\text{п}}$, по формуле (3) определялся характерный размер h/R стеклянных микросфер и эффективные модули упругости пористого материала.

На втором этапе моделирования значений эффективных упругих характеристик синтактиков при вычислениях по формуле (2) тензора c^* a = h/Rприменялся метод самосогласования [5,11]. После выполнения модельных расчетов значений ненулевых элементов c_{ij}^* $(i, j = 1, \ldots, 6)$ симметрической матрицы c^* для синтактиков вычислялись их эксплуатационные упругие характеристики – модуль Юнга E^* (ГПа) и коэффициент Пуассона ν^*. Вычисления значений E^* и ν^* выполнялись с помощью элементов c_{ij}^* матрицы c^* по следующим формулам [5]:

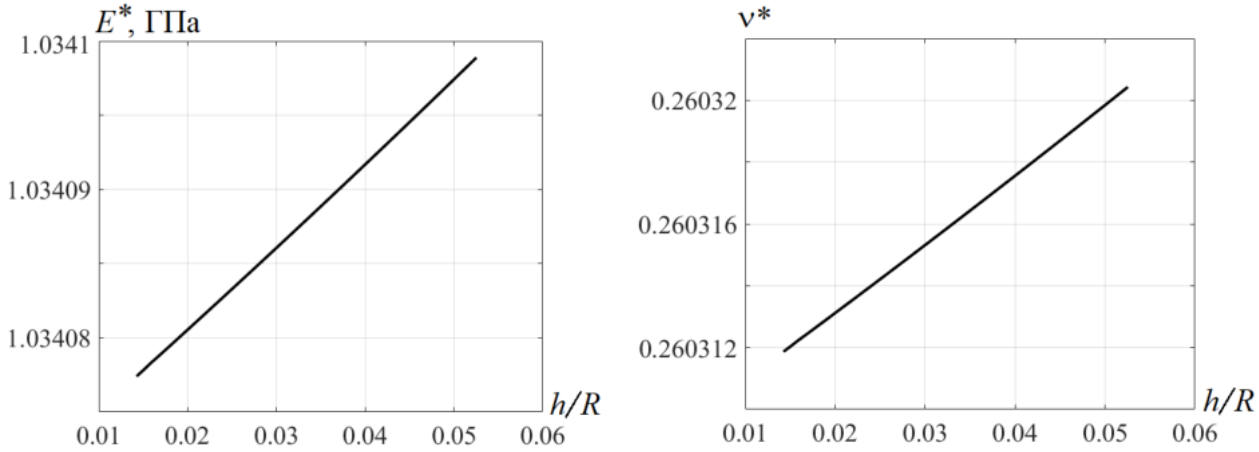
$$E^* = \frac{c_{44}^*(3c_{12}^* + 2c_{44}^*)}{c_{12}^* + c_{44}^*}, \quad \nu^* = \frac{c_{12}^*}{2(c_{12}^* + c_{44}^*)}.$$

На рис. 2 приведены графики расчетных зависимостей значений эксплуатационных упругих характеристик E^* и ν^* от параметра h/R ($0.014 \le h/R \le 0.052$) при 40 %-м объемном содержании полых микросфер в модельных синтактиках. Отметим, что при анализе значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона при других фиксированных объемных долях микросфер в модельных синтактиках получались графики аналогичного вида, отличающиеся от зависимостей, приведенных на рис. 2, только величинами E^* и ν^*.

На основании проведенного численного моделирования значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона можно заключить, что изменение безразмерного параметра h/R в диапазоне от 0.014 до 0.052 при фиксированной объемной доле полых микросфер приводит к несущественному увеличению значений E^* и ν^* по закону, близкому к линейному.

Далее в работе были проведены исследования влияния процентных концентраций микросфер V_1 и эпоксидного связующего V_2 ($V_1 + V_2 = 100\,\%$) на эксплуатационные упругие характеристики синтактиков.

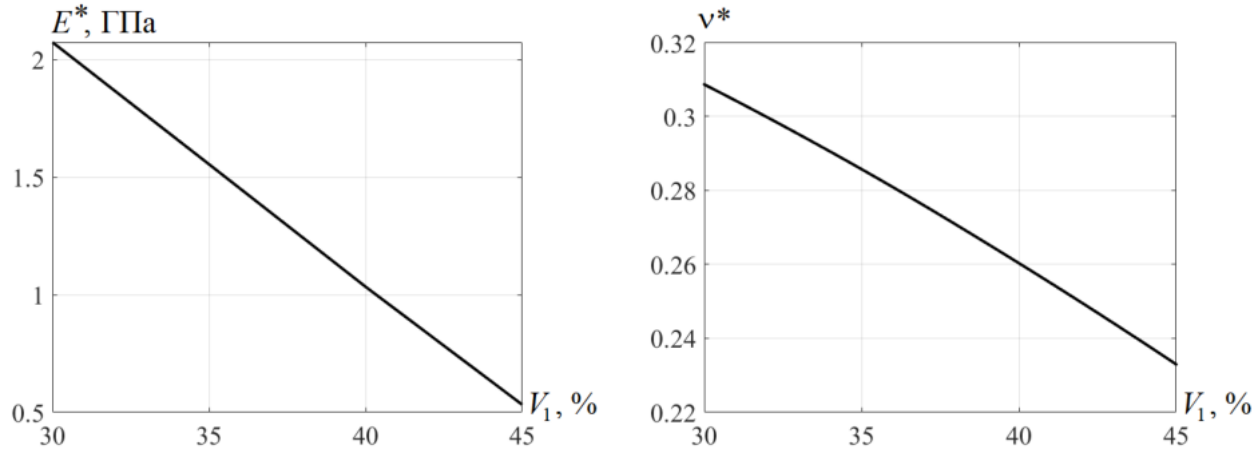
На рис. 3 представлены результаты модельных расчетов зависимостей значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона синтактиков от процентного объемного содержания в них полых стеклянных микросфер V_1 при $h/R = 0.03$.



а *б*

Рис. 2. Зависимости значений эксплуатационных упругих характеристик синтактиков от параметра h/R при 40 %-м объемном содержании микросфер в неоднородном материале: *а* – модуль Юнга; *б* – коэффициент Пуассона

На основании проведенных исследований зависимостей значений E^* и ν^* от изменений концентраций элементов неоднородности можно заключить, что увеличение процентного содержания микросфер при фиксированных значениях параметра h/R приводит к уменьшению значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона.



а *б*

Рис. 3. Зависимости значений эксплуатационных упругих характеристик синтактиков от процентного объемного содержания V_1 в неоднородном материале полых микросфер при $h/R = 0.03$: *а* – модуль Юнга; *б* – коэффициент Пуассона

Отметим также, что полученные в работе расчетные значения модуля Юнга E^* (ГПа) для эпоксидных композиций с полыми стеклянными микросферами удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным, приведенным в статье [12], согласно которым $1 \le E^* \le 3$ (при этом в [12] не указано для каких значений процентных объемных содержаний стеклянных микросфер в синтактиках и для какого вида полимерного связующего эти данные были получены).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-08-00155-а.

Библиографический список

1 **Трофимов, А.Н.** Высокотехнологичные эпоксидные связующие, полимерные композиты и инновационные технологии получения радиопрозрачных изделий специального назначения из конструкционных стеклопластиков: дисс. д. т. наук: 05.17.06 / А.Н. Трофимов. — М., 2018. — 305 с.

2 **Соколов, И.И.** Сферопластики на основе термореактивных связующих для изделий авиационной техники: дисс. к. т. наук: 05.16.09 / И.И. Соколов. — М., 2013. — 127 с.

3 **Юреско, Т.А.** Сферопластик как тепловая изоляция обитаемых подводных технических средств / Т.А. Юреско // Вестник Астраханского ГТУ. Морская техника и технология. — 2014. — № 2. — С. 21–26.

4 **Селиванов, О.Г.** Теплоизоляционные синтактовые материалы на основе термостойкого кремнийорганического полимера / О.Г. Селиванов, В.А. Михайлов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2014. — № 7. — С. 12–13.

5 **Шермергор, Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред / Т.Д. Шермергор. — М.: Наука, 1977. — 399 с.

6 **Горенберг, А.Я.** Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 3. О толщине стенок промышленных полых стеклянных микросфер / А.Я. Горенберг, А.Н. Трофимов, В.Г. Иванова-Мумжиева, Л.В. Плешков, А.В. Байков // Пластические массы. — 2021. — № 3–4. — С. 32–36. — DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-32-36.

7 Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

8 **Гутников, С.И.** Стеклянные волокна / С.И. Гутников, Б.И. Лазоряк, А.Н. Селезнев. — М.: Изд-во МГУ, 2010. — 53 с.

9 **Лапицкий, В.А.** Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков / В.А. Лапицкий, А.А. Крицук. — Киев: Наукова думка, 1986. — 92 с.

7 **Салганик, Р.Л.** Механика тел с большим числом трещин / Р.Л. Салганик // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1973. — № 4. — С. 149–158.

8 **Бардушкин, В.В.** Моделирование эксплуатационных упругих свойств полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла / В.В. Бардушкин, А.И. Сорокин, А.П. Сычев // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2015. — № 10. — С. 43–47.

12 **Трофимов, А.Н.** Многослойные композиты с высокими удельными упруго-прочностными характеристиками на основе полых стеклянных микросфер / Межд. научно-практ. конф. «Применение композиционных материалов в гражданском и военном авиастроении», 21 августа 2009 г. / А.Н. Трофимов, Л.В. Плешков // — Жуковский: «Союз производителей композитов», «Мир-Экспо» в рамках IX Международного авиационно-космического салона МАКС-2009.

УДК 539.3 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_21

И.Г. Горячева, академик РАН, **А.Р. Мещерякова (**Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН**)**

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Аннотация. *В работе приведены результаты моделирования качения с проскальзыванием упругих тел при наличии тонкого промежуточного вязкоупругого слоя, выполнен анализ распределения контактных и внутренних напряжений и разработан алгоритм расчёта накопленной в упругом материале поврежденности за заданное количество циклов нагружения в условиях трения качения. Результаты проведенного анализа влияния продольного проскальзывания и свойств материала промежуточного слоя на скорость накопления контактно-усталостных повреждений позволяют оценить эффективность применения смазочных материалов при заданных условиях эксплуатации.*

The paper presents the results of modeling the rolling of elastic bodies in the presence of a thin intermediate viscoelastic layer, an analysis of the distribution of contact and internal stresses is carried out, and an algorithm for calculating the damage accumulated in an elastic material for a given number of loading cycles under rolling friction conditions is developed. The results of the analysis of the effect of longitudinal slip and the properties of the material of the intermediate layer on the rate of contact-fatigue damage accumulation make it possible to evaluate the effectiveness of the use of lubricants under given operating conditions.

Ключевые слова: трение качения, вязкоупругий слой, подобласти сцепления и проскальзывания, контактно-усталостные повреждения.
Key words: rolling friction, viscoelastic layer, stick and slip subregions, rolling contact fatigue.

Контактно-усталостное разрушение колес и рельсов является одной из основных причин аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте, что требует как изучения этого явления, так и разработки методов борьбы с ним. Для выявления и анализа влияния различных факторов на скорость накопления усталостных повреждения в подповерхностных слоях материалов в условиях их циклического нагружения широко применяются методы математического моделирования и испытаний материалов на циклическое нагружение в разных режимах трения [1–6].

Основными этапами математического моделирования процесса накопления поврежденности в поверхностных слоях материала являются расчет контактных напряжений при заданных условиях взаимодействия, расчет внутренних напряжений в подповерхностных слоях материала, выбор критерия зарождения усталостной трещины, который, как правило, связан с критической поврежденностью материала. Критическая поврежденность материала, в свою очередь, определяется его напряженным состоянием вблизи области контактного взаимодействия, фрикционным разогревом, прочностными характеристиками материала и механизмом его разрушения [1]. При моделировании контактно-усталостного разрушения поверхностных слоев в системе «колесо-рельс» проводится расчет поврежденности материала при заданном количестве циклов нагружения, а в качестве критериев накопления усталостных повреждений выбираются, как правило, либо степенная зависимость поврежденности от величины максимальных касательных напряжений [1, 7], либо критерий Данг Вана [8, 9].

В данной работе проводится моделирование качения упругих тел при наличии тонкого промежуточного вязкоупругого слоя, а также анализ влияния продольного проскальзывания и свойств материала промежуточного слоя на нахождение мест зарождения усталостной трещины при качении.

Постановка задачи. Расчет контактных и внутренних напряжений

Рассматривается установившееся качение с постоянной скоростью V, направленной вдоль оси Ox, и угловой скоростью ω упругой сферы радиуса R по упругому полупространству, покрытому тонким вязкоупругим слоем (упругие постоянные E и ν материалов сферы и полупространства считаются одинаковыми) (рис. 1).

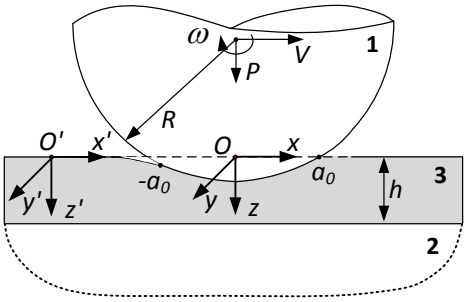


Рис. 1. Схема качения сферы *(1)* по упругому полупространству *(2)*, покрытому вязкоупругим слоем *(3)*

Распределение контактного давления $p(x, y)$ рассчитывается по теории Герца, так как податливость слоя в нормальном направлении считается пренебрежимо малой. В касательном направлении слой моделируется телом Максвелла [10], которое обладает неограниченной ползучестью:

$$\frac{\partial \dot{u}_3(x,y)}{\partial x} = \frac{h}{E_\tau}\left(-\frac{\dot{\tau}(x,y)}{VT_\tau} + \frac{\partial \tau(x,y)}{\partial x}\right), \tag{1}$$

где h – толщина вязкоупругого слоя, E_τ и T_τ – модуль упругости и время релаксации материала слоя,

$\dot{u}_3(x,y)$ – перемещения границы слоя в касательном направлении от возникающих в нем касательных (сдвиговых) напряжений $\dot{\tau}(x,y)$.

Для описания свойств слоя введём следующие безразмерные параметры:

$$\alpha_\tau = \frac{h\pi E^*}{2VE_\tau T_\tau},\ \beta_\tau = \frac{h\pi E^*}{2RE_\tau} \tag{2}$$

где

$$E^* = \frac{E}{2\left(1-\nu^2\right)}, \tag{3}$$

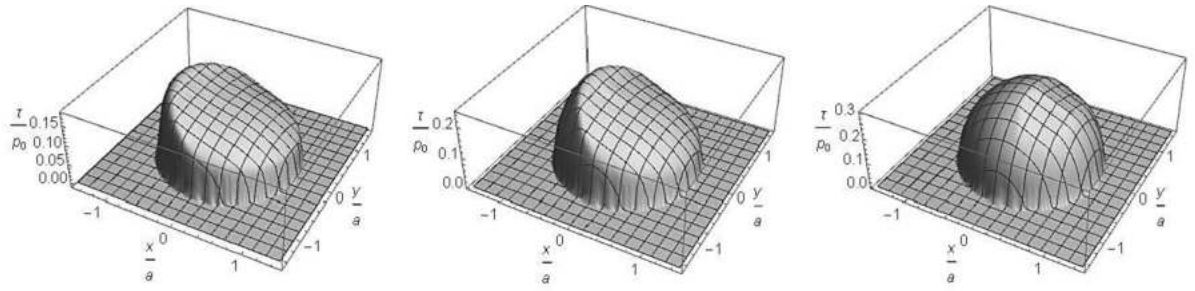
При качении вся область контактного взаимодействия Ω разделяется на подобласти относительного проскальзывания Ω_S точек взаимодействующих тел и подобласть сцепления Ω_A, где равна нулю скорость $\dot{s}(x,y)$ относительного проскальзывания контактирующих точек слоя и катящегося тела. В подобласти проскальзывания Ω_S контактное давление и касательное напряжение связаны по закону Кулона-Амонтона:

$$\dot{\tau}(x,y) = -\mu p(x,y)\frac{\dot{s}(x,y)}{\left|\dot{s}(x,y)\right|},\ (x,y)\in\Omega_S, \tag{4}$$

где μ – коэффициент трения скольжения.

Для нахождения распределения касательных напряжений и расположения подобластей сцепления и проскальзывания применяется вариационный метод, описание которого приведено в [11]. Полученное решение позволяет исследовать влияние свойств слоя и

величины относительного продольного проскальзывания сферы $\Delta_x = \dfrac{V - \omega R}{V}$ на распределение касательных напряжений.



а *б* *в*

Рис. 2. Распределение касательных напряжений при различных значениях продольного проскальзывания и свойств промежуточного слоя: $\alpha_\tau = 3$, $\Delta_x = 0{,}002$ (*а*), $\alpha_\tau = 1$, $\Delta_x = 0{,}002$ (*б*), $\alpha_\tau = 1$, $\Delta_x = 0{,}003$ (*в*)

Анализ распределения касательных напряжений (рис. 2), показывает, что с уменьшением параметра α_τ (2), характеризующего свойства слоя в касательном направлении, подобласть сцепления уменьшается, что ведет к увеличению силы сопротивления качению.

Анализ влияния параметров взаимодействия на глубину зарождения усталостной трещины

Для моделирования процесса накопления поврежденности используется макроскопический подход [12, 13], в котором поврежденность $Q(x, y, z, t)$ материала в точке (x, y, z) упругого полупространства в момент времени t описывается функцией, зависящей от амплитудных значений максимальных касательных напряжений $\Delta\tau_{\max}(x, y, z)$ в данной точке и количества циклов, при этом скорость $q(x, y, z, t)$ накопления поврежденности задается следующей функцией:

$$q(x, y, z, t) = \frac{\partial Q(x, y, z, t)}{\partial t} = c\left(\frac{\Delta\tau_{\max}(x, y, z, t)}{E^*}\right)^m \tag{5}$$

где c и m – постоянные модели, которые определяются из экспериментальных данных.

В условиях циклических нагрузок накопленная за N циклов поврежденность $Q(x, y, z, N)$ рассчитывается следующим образом:

$$Q(x, y, z, N) = \int_0^N q(x, y, z, n)dn + Q_0(x, y, z) \tag{6}$$

где $Q_0(x, y, z)$ – распределение начальной поврежденности в материале. В данном исследовании начальная поврежденность принимается равной 0.

Материал разрушается в точке (x, y, z), когда значение функции становится равным пороговому значению Q^*, т.е.

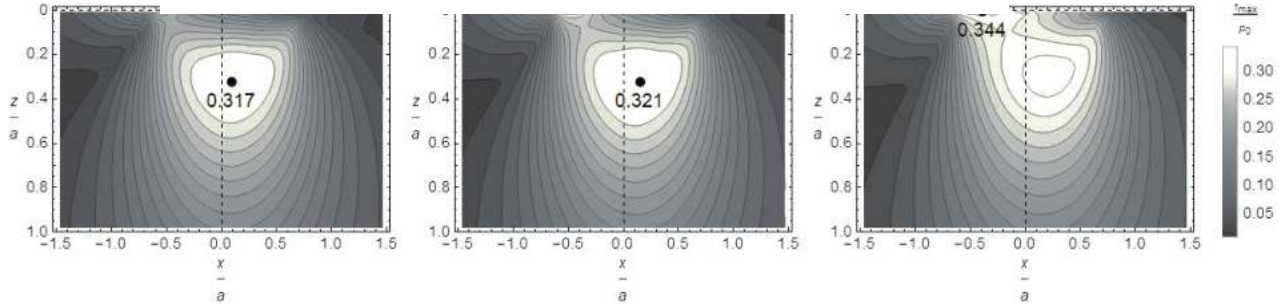
$$Q(x, y, z, N^*) = Q^* \tag{7}$$

Здесь N^* соответствует предельному количеству циклов до достижения поврежденностью порогового значения.

На рис. 3 приведены изолинии максимальных касательных напряжений в сечении $y = 0$ упругого полупространства, построенные при наличии промежуточного слоя и разных

значениях относительного продольного проскальзывания Δ_x и параметра материала слоя α_τ, который характеризует вязкость слоя в касательном направлении.

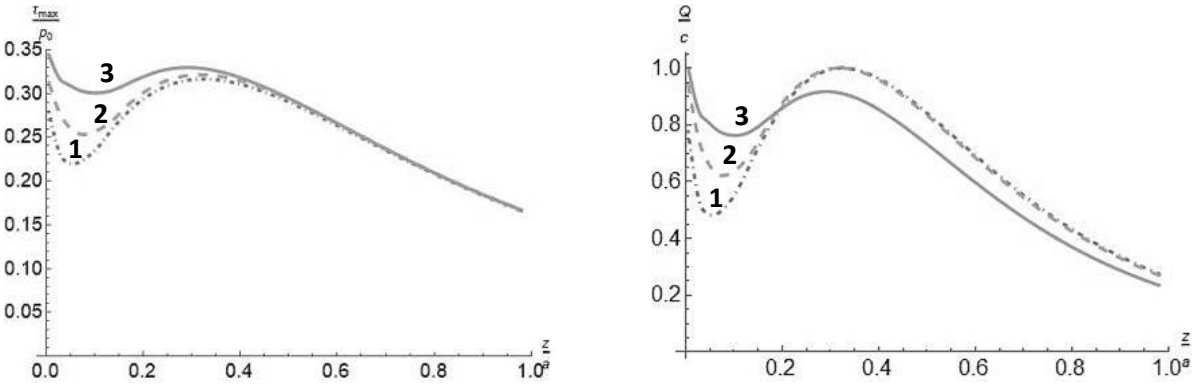
Приведенные графики иллюстрируют наличие локального максимума исследуемой функции на некоторой глубине под поверхностью и появление поверхностного локального максимума для больших значений относительного продольного проскальзывания (рис. 3, *в*). Сравнение графиков *а* и *б* на рис. 3 показывает, что с увеличением параметра α_τ, описывающего вязкость материала слоя в касательном направлении, уменьшаются значения максимальных касательных напряжений вблизи поверхности. Результаты расчетов позволяют также сделать вывод, что при качении сферы в направлении оси Ox и отсутствии бокового проскальзывания и верчения максимальные значения функции $\tau_{\max}(x, y, z)$ достигаются в плоскости $y = 0$.



а *б* *в*

Рис. 3. Изолинии максимальных касательных напряжений в сечении $y = 0$ полупространства при $\alpha_\tau = 3$, $\Delta_x = 0{,}002$ *(а)*, $\alpha_\tau = 1$, $\Delta_x = 0{,}002$ *(б)*, $\alpha_\tau = 1$, $\Delta_x = 0{,}003$ *(в)*

Расчёт напряжённого состояния в упругом полупространстве позволяет построить функцию поврежденности и провести анализ влияния свойств слоя и относительного проскальзывания на количество циклов до первого акта подповерхностного разрушения и глубину зарождения контактно-усталостных трещин. На рис. 4 приведены зависимости максимальных касательных напряжений и функции поврежденности от глубины при разных свойствах слоя и относительном проскальзывании.



а *б*

Рис.4. Зависимость максимальных касательных напряжений (*а*) и поврежденности *Q*/*c* (*б*) от глубины *z*/*a* при $m = 2$, 1 – $\alpha_\tau = 2$, $\Delta_x = 0{,}002$, $N^* = 9{,}68$, 2 – $\alpha_\tau = 1$, $\Delta_x = 0{,}002$, $N^* = 9{,}97$, 3 – $\alpha_\tau = 1$, $\Delta_x = 0{,}003$, $N^* = 8{,}44$, где *a* – радиус области контакта

Результаты показывают, что при увеличении параметра α_τ количество циклов до достижения функцией поврежденности порогового значения увеличивается. При большом

значении продольного проскальзывания контактно-усталостные трещины в первую очередь появляются на поверхности основания.

Выводы

Предложена расчетная модель и проведён анализ распределения контактных давлений и касательных напряжений в условиях качения упругих тел с одинаковыми упругими постоянными при наличии промежуточного вязкоупругого слоя. Исследовано влияние относительного продольного проскальзывания и вязкости промежуточного слоя на распределение максимальных касательных напряжений внутри упругого материала. Разработан метод расчёта накопления контактно-усталостных повреждений в поверхностных слоях упругих тел с учетом действующих контактных напряжений. Установлено, что наличие промежуточного слоя приводит к уменьшению амплитудных значений максимальных касательных напряжений на поверхности полупространства и увеличению количества циклов до первого акта разрушения.

Разработанный подход позволяет моделировать контактно-усталостное разрушение поверхностных слоев материалов в узлах трения качения при наличии смазочного слоя и количественно оценивать эффективность применения конкретных смазочных материалов при заданных условиях эксплуатации.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51005».

Библиографический список

1. **Goryacheva, I.G.** Contact Mechanics in Tribology / I.G. Goryacheva // Kluwer Aca. – 1998. – 344 p.
2. **Горячева, И.Г.** Моделирование условий образования контактно-усталостных повреждений поверхности катания / И.Г. Горячева И.Г., Е.В. Торская, М.Н. Добычин // Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов / ed. Захаров С.М. Москва: ИНТЕКСТ, – 2004. – 58–113 p.
3. **Захаров, С.М.** Об управлении трением и изнашиванием в системе колесо – рельс / С.М. Захаров, И.Г. Горячева // «Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта». – 2012. – P. 1–12.
4. **Lee, H.** The effect of water lubricant on reducing the generation of airborne wear particles from wheel–rail contacts under various train velocities / H. Lee // Tribol. Int. Elsevier. – 2020. – Vol. 150. – P. 106393.
5. **Peixoto, D.F.C.** Application of the Dang Van Fatigue Criterion to the Rail/Wheel Contact Problem / D.F.C. Peixoto, L.A.A. Ferreira, de P.M.S.T. Castro // Mater. Sci. Forum. – 2010. – Vol. 636–637. – P. 1178–1185.
6. **Torskaya, E.V.** Modeling of fatigue damage of coated bodies under frictional loading / E.V. Torskaya // Phys. Mesomech. – 2016. – Vol. 19. – № 3. – P. 291–297.
7. Freight car models and their computer-aided dynamic analysis / R. Kovalev [et Al.] // Multibody Syst. Dyn. – 2009. – Vol. 22. – № 4. – P. 399–423.
8. Criterion for High Cycle Fatigue Failure Under Multuiaxial Loading / K. Dang Van [et Al.] // Biaxial and Multiaxial Fatigue. – 1989. – P. 459–478.
9. Computer modelling of process of accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels / V. Sakalo [et Al.] // Int. J. Fatigue. Elsevier, – 2018. – Vol. 111, – P. 7–15.
10. **Кристенсен, Р.** Введение в теорию вязкоупругости. / Р. Кристенсен // Москва: Мир, – 1974.

11. **Meshcheryakova, A.R.** Stress State of Elastic Bodies with an Intermediate Layer in Rolling Contact with Slip / A.R. Meshcheryakova, I.G. Goryacheva // Phys. Mesomech. – 2021. – Vol. 24, – № 4. – P. 441–450.

12. **Ионов, В.Н.** Прочность пространственных элементов конструкций. / В.Н. Ионов, П.М. Огибалов // М.: Высш. – 1972. – 752 р.

13. **Collins, J.A.** Failure of Materials in Mechanical Design. / J.A. Collins // A Wiley-In. New York, – 1981 – 629 p.

УДК 621.01 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_26

В.А. Глазунов, д-р техн. наук, **А.Ю. Албагачиев,** д-р техн. наук, **К.А. Шалюхин,** канд. техн. наук, **С.А. Скворцов,** канд. техн. наук, **Г.В. Рашоян,** канд. техн. наук, **А.К. Алешин,** канд. техн. наук, **А.А. Романов** (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук)

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ЗУБЧАТЫМИ ЗАЦЕПЛЕНИЯМИ И УЧЕТОМ СИЛ ТРЕНИЯ В НИХ

Аннотация. *В работе рассматривается новый механизм параллельной структуры, отличительной особенностью которого является постоянство передаточного отношения между приводами и выходным звеном, что достигается реализацией кинематической развязки, посредством наличия в каждой кинематической цепи карданных шарниров, цилиндрических и конических зубчатых передач. Также рассмотрены структурный анализ, решена задача о положении, определена рабочая зона и проведен силовой анализ с учетом сил трения в парах зацепления.*

The paper considers a new parallel mechanism, which distinctive feature is a constant speed ratio between the drives and the output link. It is achieved by the kinematic decoupling and by using the universal joints, cylindrical and bevel gears in each kinematic chain. The paper also presents the structural analysis, solution of the position problem, construction of the working area, and the force analysis considering the friction forces between the gears.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, кинематическая развязка, зубчатое зацепление.
Key words: parallel mechanism, kinematic decoupling, gearing.

Одной из важнейших составляющих решения многих технических задач являются механизмы параллельной структуры [1, 2]. Повышение эффективности данных механизмов может осуществляться за счет реализации кинематической развязки [3, 4], поскольку наличие кинематической развязки упрощает систему управления и повышает динамическую точность. Это обусловлено постоянством передаточного отношения между приводами и выходным звеном, что достигается за счет использования зубчатых передач.

Следует отметить, что наличие зубчатых зацеплений требует учета сил трения в этих узлах, однако трению в механизмах параллельной структуры посвящено незначительное число работ, впрочем, фундаментальные проблемы, связанные с трением в механизмах, рассмотрены весьма подробно [5]. Это касается в том числе таких механизмов, которые применяются для хирургических операций и имеют схваты, взаимодействующие с тканями внутренних органов [6].

Структура механизма с шестью степенями свободы.

В ходе структурного синтеза было выявлено, что для обеспечения шести степеней свободы необходимо использовать три параллельно идущие кинематические соединительные цепи, каждая из которых содержит два карданных шарнира. Данные кинематические цепи

формируют собой передаточный механизм, отвечающий за передачу крутящего момента от приводов ко второму зубчатому механизму, отвечающему за ориентацию выходного звена в пространстве. Отличительной особенностью данного механизма является наличие кинематической развязки, что в свою очередь обуславливает независимости вращательных и поступательных перемещений выходного звена, а также обеспечивает постоянство передаточного отношения между приводами и выходным звеном (Рис. 1).

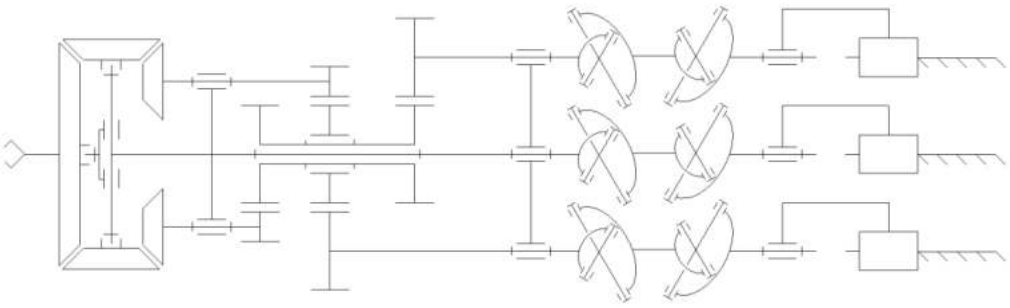


Рис. 1. Структурная схема механизма

Данный механизм можно разделить на 2 кинематические составляющие, отвечающие за линейные перемещения механизма и ориентацию выходного звена.

Первая часть механизма представляет из себя три кинематические цепи, объединенные между собой пространственной платформой. Для удобства примем, что соединительные кинематические цепи, представленные в виде прямолинейных валов, включающие в себя по два карданных шарнира, не имеют вращательных кинематических пар. В таком случае число степеней свободы определяется по формуле Сомова П.О. и Малышева А.П. и равняется трем:

$$W = 6 \cdot 13 - 5 \cdot 15 = 3$$

Однако, с учетом вращения каждой кинематической цепи, получаем число степеней свободы равное шести.

Вторая часть механизма представляет передаточный механизм, объединенный с зубчатым механизмом, обеспечивающий передачу вращательных движений на выходное звено. Поскольку данный механизм зафиксирован относительно пространственной платформы, для удобства будем считать её основанием данного механизма. В таком случае механизм имеет 12 элементов, 11 из которых являются подвижными. По формуле Чебышева П.Л. получаем, что число степеней свободы равняется трем:

$$W = 3 \cdot 11 - 2 \cdot 11 - 8 = 3$$

При объединении составляющих данного механизма получаем: три позиционирующие степени свободы и три ориентирующие степени свободы, что в результате дает шесть степеней свободы.

Решение обратной задачи о положениях

Рассмотрим решение относительно поступательных перемещений, для этого определим точку пересечения трех осей вращения выходного звена и, при помощи матриц переходов Денавита-Хартенберга, определим координаты центров нижних крестовин карданных валов.

Следующим шагом будет определение центральных точек верхних крестовин, поскольку основание неподвижно и расстояние от направляющей до центральной точки ближайшей крестовины неизменно, можно заметить что координаты xv_i и $yv_i \left(i = 1,\ldots,3\right)$ будут постоянными, исходя из этого требуется определить только координату $zv_i \left(i = 1,\ldots,3\right)$. Зная длину тяги между нижней и верхней крестовинами определим недостающие координаты верхних крестовин.

Получив координаты центральных точек верхних крестовин, найдем координаты центральных точек ползунов, после определения координат центральных точек ползунов, определяем перемещения в поступательных приводах.

Для решения обратной задачи о положениях ориентацию выходного звена можно задать углами поворотов выходного звена, в случае же, если ориентация задается двумя единичными векторами и координатами центральной точки, имеет место определение углов поворотов выходного звена с помощью матрицы переходов Денавита-Хартенберга. Имея углы поворотов выходного звена, определяем углы поворотов в приводах, с учетом передаточных отношений и конструкционных особенностей механизма, например при повороте выходного звена относительно оси OZ работают одновременно все три привода, чтобы исключить повороты выходного звена относительно остальных осей вращения.

Определение рабочей зоны механизма

Построение рабочей зоны механизма является неотъемлемой частью при синтезе и анализе нового механизма. Определение рабочей зоны механизма основывается на решенной задаче о положениях, в нашем случае будет определена рабочая зона относительно поступательных перемещений выходного звена, поскольку в каждой точке полученной области выходное звено сможет иметь одинаковую ориентацию.

Определим область заведомо большую, чем рабочая зона механизма и шаг по каждой из координат, с которым будет проводиться проверка.

Далее проверяем каждую точку из данной области, относительно координат выходного звена определяем координаты трех нижних крестовин, затем определяем высоту верхних крестовин, если хоть одно значение комплексное, следовательно, данная точка не входит в рабочую зону механизма. В случае, когда все три высоты не комплексные числа, проверяем принадлежат ли они интервалам возможных значений, если принадлежат, то данная точка входит в рабочую зону механизма.

Полученные результаты представлены на рисунке 2.

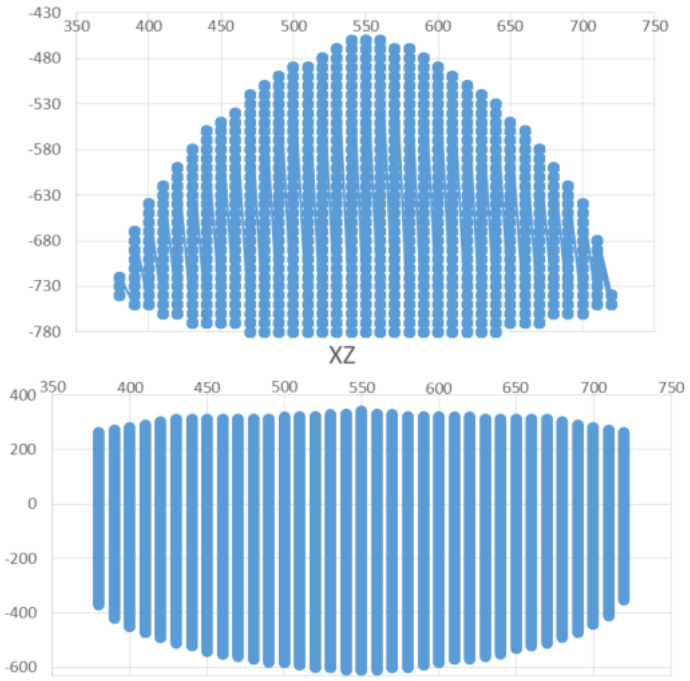


Рис. 2. Рабочая зона механизма

Влияние сил трения

Важной научно-технической задачей для динамических моделей с зубчатыми зацеплениями является трение, поскольку данный параметр либо не учитывается, либо

заменяется неким коэффициентом, варьирующимся в широком диапазоне. В данной работе рассматривается влияние сил трения на механизм, имеющий множественные зубчатые зацепления.

Точка контакта перемещается по линии зацепления M1M2 в пределах рабочей части линии зацепления [m1, m2], по мере движения точки контакта скорость скольжения уменьшается по мере приближения к полюсу зацепления, а в самом полюсе зацепления скорость скольжения профилей зубьев равняется нулю (Рис. 3). Поскольку вектор силы трения напрямую связан с вектором скорости скольжения профилей зубьев, в полюсе зацепления силы трения не возникает, таким образом наилучшим для работы механизма будем считать случай, когда во всех зубчатых зацеплениях точка контакта находится в полюсе зацепления.

В данном случае направление вектора реакции на крутящий момент $M_{вых}$ нам известно, зная направление можем провести перпендикуляр из точки С к прямой коллинеарной вектору реакции $\boldsymbol{Fr}2$, данный перпендикуляр будет плечом силы $\boldsymbol{r}2$. Зная данный вектор, можно определить вектор $\boldsymbol{Fr}2$.

Зная координаты точки B, определяем вектор идущий от этой точки до точки С. Зная направление вектора реакции $\boldsymbol{Fr}2$ и вектор $\boldsymbol{BC}$, не сложно определить угол между ними, а затем и длину вектора $\boldsymbol{r}2$. Зная длину вектора $\boldsymbol{r}2$, определим длину вектора $|\boldsymbol{Fr}2|$ воспользовавшись уравнением $|\boldsymbol{Fr}2|\cdot|\boldsymbol{r}2|-M_{\text{вых}}=0$, $|\boldsymbol{Fr}2|=M_{вых}/|\boldsymbol{r}2|$. Получив длину вектора $|\boldsymbol{Fr}2|$, можем определить $M_{вх}$ по формуле:

$$M_{вх}=|\boldsymbol{Fr}2|\cdot|\boldsymbol{r}2|=|\boldsymbol{Fr}1|\cdot|\boldsymbol{r}1|.$$

Поскольку в полюсе зацепления нет сил трения скольжения, а расстояние от точек А и С до точки Р равны, плечи сил будут равными по модулю.

$$M_{вх}=|\boldsymbol{Fr}1|\cdot|\boldsymbol{r}1|=|\boldsymbol{Fr}2|\cdot|\boldsymbol{r}1|=|\boldsymbol{Fr}2|\cdot|\boldsymbol{r}2|$$

Таким образом получаем, что в полюсе зацепления моменты входа и выхода равны.

В случае же, когда точка контакта профилей зубьев будет находиться в крайней точке рабочей части линии зацепления (Рис. 3), вектор скорости и сила трения будет максимальной, примем его как наихудший сценарий.

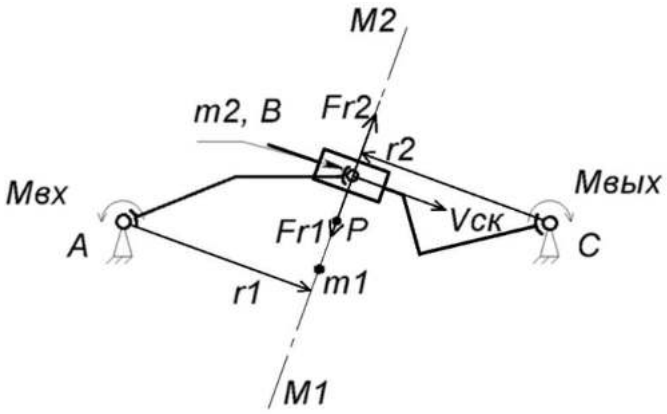


Рис. 3.

Для определения скорости скольжения профилей зубьев воспользуемся системой уравнений:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_A+\boldsymbol{\omega}_B+\boldsymbol{\omega}_C=0 \\ \boldsymbol{\rho}_A\times\boldsymbol{\omega}_A+\boldsymbol{\rho}_B\times\boldsymbol{\omega}_B+\boldsymbol{\rho}_C\times\boldsymbol{\omega}_C+\boldsymbol{V}_{ск}=0 \\ \boldsymbol{V}_{ск}\cdot PB=0 \end{cases}$$

Поскольку отклонение точек A,B,C относительно координаты OZ равно нулю, а вращение идет относительно оси координат OZ получаем, что $\rho_{Az}=\rho_{Bz}=\rho_{Cz}=0$, $\omega_{Ax}=\omega_{Ay}=\omega_{Bx}=\omega_{By}=\omega_{Cx}=\omega_{Cy}=0$ следовательно, система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \omega_{Az}+\omega_{Bz}+\omega_{Cz}=0 \\ \rho_{Ay}\cdot\omega_{Az}+\rho_{By}\cdot\omega_{Bz}+\rho_{Cy}\cdot\omega_{Cz}+V_{ск_x}=0 \\ -\rho_{Ax}\cdot\omega_{Az}-\rho_{Bx}\cdot\omega_{Bz}-\rho_{Cx}\cdot\omega_{Cz}+V_{ск_y}=0 \\ V_{ск_x}\cdot PB_x+V_{ск_y}\cdot PB_y=0 \end{cases}$$

В данном случае для определения вектора реакции $\boldsymbol{Fr2'}$ необходимо знать коэффициент силы трения, для определения отклонения вектора $\boldsymbol{Fr2'}$ с учетом сил трения и без учета сил трения $\boldsymbol{Fr2}$. Сила трения $\boldsymbol{F_{тр}}$ перпендикулярна линии зацепления и направлена в противоположенном направлении вектора скорости скольжения, мы знаем, что вектор $\boldsymbol{Fr2'}$ отклоняется от вектора силы трения на угол равный $\arctan(f)$, где f – коэффициент силы трения, зная данные параметры, определим направление вектора реакции с учетом силы трения $\boldsymbol{Fr2'}$ (Рис. 4).

Зная координаты точек A, B, C можем найти векторы $\boldsymbol{BA}$, $\boldsymbol{BC}$ и их длины. Затем возьмем вектор $\boldsymbol{BP}$, который нужен для определения плеча силы $\boldsymbol{r}2$. Определив угол α между векторами $\boldsymbol{BP}$ и $\boldsymbol{BC}$, найдем длину плеча силы $|\boldsymbol{r}2|=|\boldsymbol{BC}|\cdot\cos(a)$. Затем определяем длину плеча силы $|\boldsymbol{Fr2'}|=M_{вых}/|\boldsymbol{r}2|$.

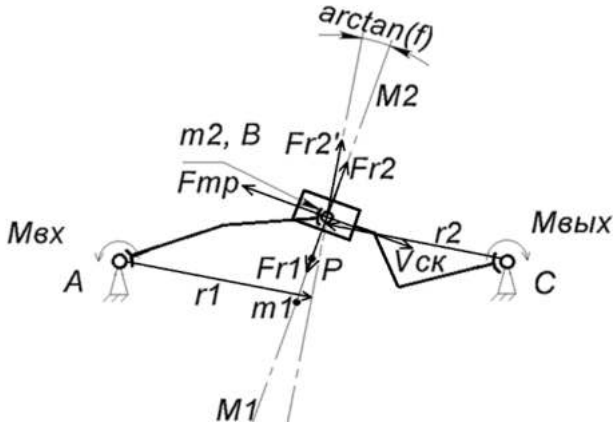


Рис. 4.

После найдем длину плеча силы $\boldsymbol{r}1$, вектор реакции $\boldsymbol{Fr2'}=-\boldsymbol{Fr1'}$, таким образом получаем: $M_{вх}=|\boldsymbol{Fr2'}|\cdot|\boldsymbol{r}1|$.

В ходе расчетов крутящих моментов в механизме, описанном выше, были получены следующие результаты (Табл.1).

Таблица 1

Расчет крутящих моментов в случаях отсутствия и наличия трения

	Вых. звено	1 зацепление	2 зацепление	3 зацепление	В приводах
$f=0$	50 Н · м	157,5 Н · м	157,5 Н · м	78,75 Н · м	78,75 Н · м
$f=0{,}16$	50 Н · м	165,36 Н · м	180,35 Н · м	97,04 Н · м	97,15 Н · м
Несоответствие	0%	4,99%	14,51%	23,22%	23,37%

Заключение

В данной работе представлен новый механизм параллельной структуры с кинематической развязкой. Отличительной особенностью данного механизма является наличие в каждой из трех кинематических цепей двух карданных шарниров и зубчатых передач. Такая структура может обусловить постоянство передаточного отношения для вращательных движений, что невозможно при наличии кинематических цепей с вращательными парами. Указанное свойство важно при динамическом анализе и управлении, оно может повысить динамическую точность данного устройства.

По мнению авторов, важно то, что в данном исследовании представлена оценка влияния трения в кинематических цепях. Подобный учет силы трения весьма редко присутствует в работах по синтезу и анализу механизмов параллельной структуры.

Дальнейшие исследования рассмотренного объекта будут направлены на разработку алгоритмов динамического анализа, выявление особых положений, а также более детального рассмотрения сил трения, возникающих в низших и высших кинематических парах данного механизма параллельной структуры.

Библиографический список

1. **Ганиев, Р. Ф.** Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения / Р.Ф. Ганиев, В.А. Глазунов // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. 2015. № 11. 16 с

2. Systematic Design of a Parallel Robotic System for Lower Limb Rehabilitation / C. Vaida [el Al.] // IEEE Access. 2020. vol. 8. P. 34522-34537.

3. Механизмы параллельной структуры с групповой кинематической развязкой, обеспечиваемой многопоточностью передачи энергии в кинематических цепях / К.Б. Саламандра [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 5. С. 56-65.

4. Исследование свойств пространственных механизмов с шестью степенями свободы / С.В. Хейло [и др.] // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2021. № 3(288). С. 28-33.

5. Теория внешнего трения / А.Ю. Албагачиев [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 2 (322). С. 53-55.

6. **Горячева, И.Г.** Задачи механики контактных взаимодействий при разработке зажимных медицинских инструментов / И.Г. Горячева, А.А. Яковенко // Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред. Горис, Армения, 01–06 октября 2018 года. С. 128-132.

УДК 621.891 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_31

Н.К. Мышкин, академик НАН Беларуси**, А.Я. Григорьев,** д-р техн. наук, (Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРИБОЛОГИИ

Аннотация. *Выполнен анализ проблем теории трения в условиях деформации и действия поверхностных сил на фрикционном контакте. При этом отмечено, что проблемы теории не тормозят развитие трибологии в практических приложениях. Намечены перспективы развития трибологии.*

The analysis is made of the friction theory problems related to interaction of mechanical factors and surfaces forces in a friction contact. It is mentioned that the problems in theory are not damping the progress of tribology in its practical aspects. The prospects of tribology are outlined.

Ключевые слова: трение, деформация, адгезия, масштабный фактор.
Keywords: friction, deformation, adhesion, scale factor.

Введение

В марте 2016 года исполнилось полвека понятию трибология, которое было определено в докладе Рабочей группы Джоста Правительству Великобритании (1966): “Трибология — наука о взаимодействии поверхностей в относительном движении и связанные с ней практические аспекты” [1].

Исторически теория трения развивалась по двум направлениям, называемым деформационным и адгезионным [2]. Однако, несмотря на успехи этих направлений общая теория трения пока не завершена. Причина, на наш взгляд, в различии масштабов, в которых процессы трения анализируются. Нагрузка на контакт, его геометрия и микрогеометрия, а также механические характеристики материалов определяют деформационные процессы, но анализ этих факторов зависит от масштаба рассмотрения. Расчеты поверхностных сил и адгезии также сильно зависят от этого масштаба также, как и закономерности преобразования энергии трения в тепло.

Отсутствие общей теории не остановило разработку эффективных узлов трения благодаря успехам в конструировании, новым материалам, смазкам и покрытиям, методам испытаний на трение и износ. Экономические выгоды от развития трибологии имеют огромные резервы роста [1-3]. Эти выгоды в полной мере заметны на транспорте, где роль триботехники очень велика и в ее развитии очень важное место принадлежит академику В.И. Колесникову юбилей которого мы отмечаем в эти дни [4].

Состояние вопроса

Сегодня мы можем лишь схематически представить факторы, действующие на фрикционном контакте, и их влияние на разных масштабных уровнях. Однако, ключевым остается вопрос соотношения компонент силы трения в различных условиях [2, 5, 6].

На микроуровне роль адгезии и поверхностных сил очень велика. Действие поверхностных сил приводит к формированию пятен фактического контакта, а процессы образования и разрыва межатомных и межмолекулярных связей определяют адгезионную составляющую трения. В общем случае образование, рост и разрушение связей определяются природой контактирующих поверхностей, химическими процессами, протекающими на них, и, в меньшей мере, напряженным состоянием поверхностных слоев под нагрузкой.

Деформация, происходящая при вступлении в контакт неровностей двух скользящих поверхностей, сопровождается диссипацией энергии, которая определяется условиями трения, свойствами контактирующих материалов и окружающей среды. Кроме того, при скольжении механические свойства материалов могут изменяться под действием тепла, генерируемого при трении. Масштаб деформационных процессов распространяется и на прилегающие к площади фактического контакта микрообъемы материала и на более удаленные от нее слои. Соотношение упругих и пластических деформаций в различных масштабах значительно усложняет рассмотрение контактных задач механики [5,6].

Обычно характер изнашивания определяют по доминирующей составляющей силы трения [4]. Усталостное и абразивное изнашивание связывают в основном с деформацией материала при трении, в то время как адгезионное изнашивание с действием поверхностных сил, характером разрушения материала и его фрикционного переноса. Весьма полезным явилось введенное И.В.Крагельским понятие «третьего» тела в контакте, которое позволило рассмотреть граничный слой из продуктов разрушения и реакций, как отдельный объект трибосистемы [6].

Перспективы теории трения

Молекулярно-механическая теория трения и механика контакта твердых тел быстро развиваются, и уже решены контактные задачи для трибосистем с учетом адгезионных взаимодействий и эффектов взаимовлияния пятен контакта, а также масштабного фактора [6]. Тем не менее, приложение теории к практическим задачам остается сложным, а инженерам-конструкторам и материаловедам приходится во многом полагаться на накопленный опыт и

на данные триботехнических испытаний в лабораторных, стендовых и натурных условиях работы трибосистем [7].

Нагрузка на контакт, его геометрия и микрогеометрия, а также механические характеристики материалов определяют деформационные процессы, но анализ этих факторов зависит от масштаба рассмотрения. Поверхностные силы и адгезия также сильно зависят от этого масштаба. Закономерности преобразования энергии трения в тепло также зависят от масштабного фактора.

Отсутствие общей теории не остановило разработку эффективных узлов трения благодаря успехам в конструировании, новым материалам, смазкам и покрытиям, методам испытаний на трение и износ. Экономические выгоды от развития трибологии имеют огромные резервы роста [1-3].

Перспективы инженерной практики

Создание новых конструкционных и смазочных материалов является ключевым фактором развития практической трибологии. На наш взгляд полимерным материалам принадлежит особое значение в этой сфере. Во-первых, преимущество полимеров в их малой массовой плотности приводит к резкому снижению веса машин, и соответственно к снижению потерь на их перемещение, а это весь транспорт человечества (самый наглядный пример – это авиация, где фактор массы первостепенен). Во-вторых, многие полимеры и композиты на их основе более стойки к действию окружающей среды, а это тоже снижает потери материалов в машинах. И, в-третьих, многие полимеры обладают смазывающей способностью и это дает прямой трибологический эффект для многих узлов трения.

Для наглядности рассмотрим потенциал полимеров в автомобиле с ДВС, где на преодоление трения затрачивается около трети энергии топлива, из которой в двигателе и трансмиссии тратится примерно половина этой трети, а в шинах и тормозах еще столько же [3]. Снижение потерь в двух последних трибосистемах (шины и тормоза) напрямую связано с успехами в разработке полимерных композитов.

Инженерия поверхности – это быстро растущая область трибологии и в ней полимерам принадлежит важное место в связи с их использованием при нанесении антифрикционных и износостойких покрытий. Полимеры хорошо совмещаются с аддитивными технологиями, и это дает им важное преимущество в сравнении с другими типами материалов.

Получение поверхностей с заданным типом рельефа и формой неровностей еще один резерв потенциала трибологии. Сегодня технологии инженерии поверхности включают методы лазерной обработки, литографии, травления и 3D печати [8]. Регулярные рельефы поверхностей уже используются, например, при изготовлении скользящих электрических контактов. Нанесение регулярного рельефа позволяет равномерно распределить механическую и электрическую нагрузку, а контакт, в котором пучки волокон равномерно распределены в матрице композита, позволяет передавать большие токи на высоких скоростях с малым трением [9]. Нанесение регулярных микрорельефов широко используется и при создании подшипников с гидродинамической смазкой, а прогресс аддитивных технологий открывает для этого новые перспективы.

Большие резервы для практической трибологии заключены в совершенствовании методов и средств испытаний на трение и износ. Разработку методик испытаний материалов на трение и износ и оборудования для них можно считать одной из сложных задач практической трибологии. Еще более усложняет эту задачу быстрое расширение диапазона сил и скоростей работы механизмов в экстремальных условиях. Технический прогресс характеризуется размахом от сверхмалых значениий действующих факторов в современных МЭМС до критических значений в атомной и космической технике. Один из эффективных методов решения проблем анализа результатов различных видов испытаний основан на оценке параметрической эквивалентности их условий [7].

Все большее практическое значение имеют методы машинного зрения и обработки изображений для оценки морфологии поверхностей и частиц износа, средств и методов активного мониторинга процессов трения и изнашивания.

«Зеленая» трибология

Глобальная экология также в значительной мере зависит от решения трибологических проблем. Вредные выбросы газов и загрязнений в окружающую среду могут быть значительно снижены при совершенствовании узлов трения машин. Загрязнение этой среды можно уменьшить и за счет применения более экологичных смазочных материалов. В железнодорожном транспорте положительный эффект может быть достигнут при использовании таких материалов в лубрикаторах, используемых для смазывания контакта колес на отдельных участках рельсового пути. Начиная с 1990х годов, экологические нормы начали резко ограничивать использование минеральных смазок в сельском и лесном хозяйстве, и ЕЭС приняло директивы по «зеленой технологии» стимулирующие использование растительных масел. По нашим данным, эти масла демонстрируют в испытаниях хорошие показатели смазочной способности в сравнении с минеральным маслом [10].

Большие перспективы для зеленой трибологии имеют полимерные композиты, которые, как отмечено выше, стремительно проникают во все области триботехники. Использование эффективных природных наполнителей, например, наноглин и растительных компонентов, а также разработка биоразлагаемых полимеров позволяет решить актуальную проблему их рециклинга.

Выводы

Трибология уже достигла зрелости в переходе от отдельных научных направлений к синтетическому подходу. Теория продолжает развиваться, опираясь на достижения в аналитическом и вычислительном оборудовании, а практические результаты и технические достижения позволяют говорить о значительных успехах в экономии энергии, материалов и людского труда, достигающих нескольких процентов ВВП развитых стран. «Зеленая» трибология развивается очень быстро по многим направлениям, в первую очередь связанным с снижением потерь энергии на трение и вредных выбросов в окружающую среду. Информационная составляющая трибологии, количество журналов, книг и международных конференций также растет очень быстро, включая новые развивающиеся страны на всех континентах.

Авторы выражают благодарность Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований за поддержку исследований в рамках проектов №Т20КИТГ-004 и Т21ЭТ-018.

Библиографический список

1. **Jost, H.P.** Int. Conf. 50-th anniversary of the “JOST Report”. / H.P. Jost / London, IMechE: 2016. – P. 1-3.

2. **Мышкин, Н.К.** Трибология: тенденции полувекового развития / Н.К. Мышкин, И.Г. Горячева // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, № 6. – С. 665-669.

3. **Holmberg, K.** Friction and Energy Saving / K. Holmberg // Int. Conf. 50-th anniversary of the “JOST Report”. London, IMechE: 2016. – P. 12-13.

4. **Колесников В.И.** Транспортная триботехника / В.И. Колесников, В.В. Шаповалов, В.А. Кохановский // Ростов-на-Дону: РГУПС, 2006. — С. 476

5. **Петроковец, М.И.** Некоторые статистические модели фрикционного контакта / М.И. Петроковец, Н.К. Мышкин, С.А. Чижик // Трение и износ. – 1997. – Т.18, № 2. – С. 147-154.

6. **Горячева, И.Г.** Итоги развития молекулярно-механической теории трения / И.Г.

Горячева, М.Н. Добычин // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 4. С. 327—337.

7. Наземные и бортовые испытания материалов на трение в космосе / Н.К. Мышкин [и др.] // Информатика. – 2007. – № 3. – С. 41-50

8. Григорьев, А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А.Я. Григорьев // Минск: Беларуская навука, 2016. – С. 248.

9. **Мышкин, Н.К.** Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович М. // М.: Интеллект, 2008. – С. 560.

10. Влияние жирнокислотного состава и структуры алкильных радикалов триглицеридов растительных масел на их триботехнические характеристики / А.Я. Григорьев [и др.] // Трение и износ – 2016. – Т. 37, №6. – С. 755-759.

УДК 621.9 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_35

М.А. Броновец, канд. техн. наук (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН)

ОТКРЫТЫЙ КОСМОС: ПРОБЛЕМЫ ТРИБОЛОГИИ И ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ

Аннотация. *В докладе показаны проблемы трибологии в современной космической технике. Приведена классификация конструкционных и смазочных материалов для подвижных сопряжений и узлов трения космических изделий. Показаны допустимые диапазоны температур и области применения материалов. Описана целесообразность проведения трибологических испытаний в открытом космосе.*

The report shows the problems of tribology in modern space technology. The classification of structural and lubricating materials for movable joints and friction units of space products is given. Allowable temperature ranges and material applications are shown. The expediency of conducting tribological tests in open space is described.

Ключевые слова: Открытый космос, материалы космического применения, узлы трения космических изделий, испытания в открытом космосе
Keywords: Open space, materials for space applications, friction units for space products, tests in open space

Введение

С проблемами трибологии в космических изделиях человечество столкнулось уже при запуске в Советском Союзе первых спутников. В подшипниках скольжения происходило схватывание сопрягаемых поверхностей и их заклинивание, что приводило к авариям при выводе спутников на орбиту. Первое и эффективное решение проблемы состояло в применении мягких металлов на поверхностях трения.

Проблемы трибологии становились всё более ощутимыми в связи с созданием приводов поворота солнечных батарей, механизмов настройки аппаратуры в спутниках зондирования Земли, механизмов стыковочных устройств, создания систем стабилизации космических аппаратов, созданием движителей планетоходов, устройств забора грунта на планетах.

Узлы трения должны работать в том числе на теневой стороне космических изделий, где температуры опускаются до минус 110 градусов Цельсия. Если говорить о Луне, то там на выносной антенне в Лунную ночь была измерена температура минус 180 градусов Цельсия.

Нынешние смазочные композиции при таких температурах замерзают и работу подвижных сопряжений обеспечить не могут. Кроме того, они должны работать в течение многих лет. Под действием солнечной радиации, космических излучений происходит быстрое

старение смазок, и они не могут обеспечить требуемую смазочную способность и работоспособность узлов трения.

Их условия работы сильно различаются в зависимости от назначения устройств, в которых они стоят. Скорости скольжения, как правило, не превышают 1,5 м/сек, удельные давления для пар скольжения менее 100 кг/см^2. Это предельные значения, за исключением редких случаев (например, шасси «Бурана»).

В некоторых случаях первостепенную роль играет трение без скачков (stick-slip) при очень малых переменных скоростях относительного перемещения (например, при наблюдении за пролетающими объектами или поверхностями планет).

Для стыковочных узлов чрезвычайно важны адгезия и статическое трение контактирующих поверхностей.

Создание узлов трения космической техники

Пожалуй, одними из самых ответственных космических изделий являются стыковочные устройства орбитальных станций, в частности Международной космической станции. Доставка научной аппаратуры и различных грузов на станцию, смена экипажей, замена модулей станции связаны с работой стыковочных устройств. Их привода включают подшипники качения и скольжения, зубчатые колёса, уплотнители мест прилегания поверхностей, даже тормозные устройства. Стыковочные устройства должны обеспечить герметизацию сопрягаемых модулей.

Важными узлами трения являются манипуляторы, которые всё чаще используются для обслуживания внешней поверхности космических изделий. Например, на Международной космической станции их установлено 3 манипулятора (один на Российском сегменте – изготовлен в Германии, один на американском сегменте – изготовлен в Канаде, один на Японском сегменте – изготовлен в Японии). Многоразовый корабль «Шаттл» имеет собственный манипулятор для перемещения грузов из своего грузового отсека. Все перечисленные манипуляторы имеют размеры, измеряемые в метрах (рука канадского манипулятора имеет 17,6 метра длины). Они содержат силовые приводы и шарниры сопряжений элементов. Они работают в открытом космосе и относятся к числу очень ответственных изделий космической техники. Все они выполняют функции перемещения оборудования, грузов и даже космонавтов. Срок их работоспособности и эффективность работы определяются износостойкостью подвижных сопряжений.

Одной из важнейших задач современного этапа проведения работ на внешней стороне Международной космической станции является создание робототехнических систем, которые помогут космонавтам выполнять внекорабельную деятельность или даже взять на себя часть функций космонавтов. Один из них уже испытывался внутри герметичного объёма станции. Теперь очередь провести разработку робота и его испытания на внешней стороне МКС.

Требования достижения требуемой точности позиционирования и срабатывания робота предусматривают применение подшипников качения в его подвижных сочленениях начиная от пальцев рук до локтей, коленных, плечевых суставов, выполнения поворотных движений. Подшипники смазываются низкотемпературными смазками. Их было разработано немало для различных механизмов. Но, как правило, для ответственных узлов применяется тепловакуумная изоляция, чтобы не допустить их работы при сверхнизких температурах.

Если говорить об исследованиях на планетах, то первостепенное значение приобретают планетоходы. При создании транспортных средств для других планет среди важнейших проблем стоит проблема выбора типа движителя, приводов движения, механизмов перемещения, шарниров солнечных батарей. Вопрос перемещения планетоходов всегда вызывал много споров, которые обострялись недостаточными знаниями характеристик грунтов, по которым предстояло им перемещаться. При этом ясно, что они должны отличаться повышенной проходимостью и устойчивостью, а для перемещения космонавтов и достаточной комфортабельностью хода. При разработке шасси на первое место выдвигались

проблемы адгезии движителей и грунтов, а также их сцепление, в особенности при передвижении по поверхностям кратеров, изучение которых представляет особый интерес.

Материалы для узлов трения

При конструировании приборов, машин и механизмов, предназначенных для длительной эксплуатации в экстремальных условиях, в частности, для работы в космическом вакууме и некоторых газовых средах, в широком диапазоне температур, нагрузок и скоростей скольжения, возникает проблема обеспечения работоспособного состояния узлов трения этих приборов, машин и механизмов. Критерием работоспособности узлов трения при этом является сохранение заданных техническими условиями значений коэффициента трения, фрикционной тепло- и износостойкости сопряжения.

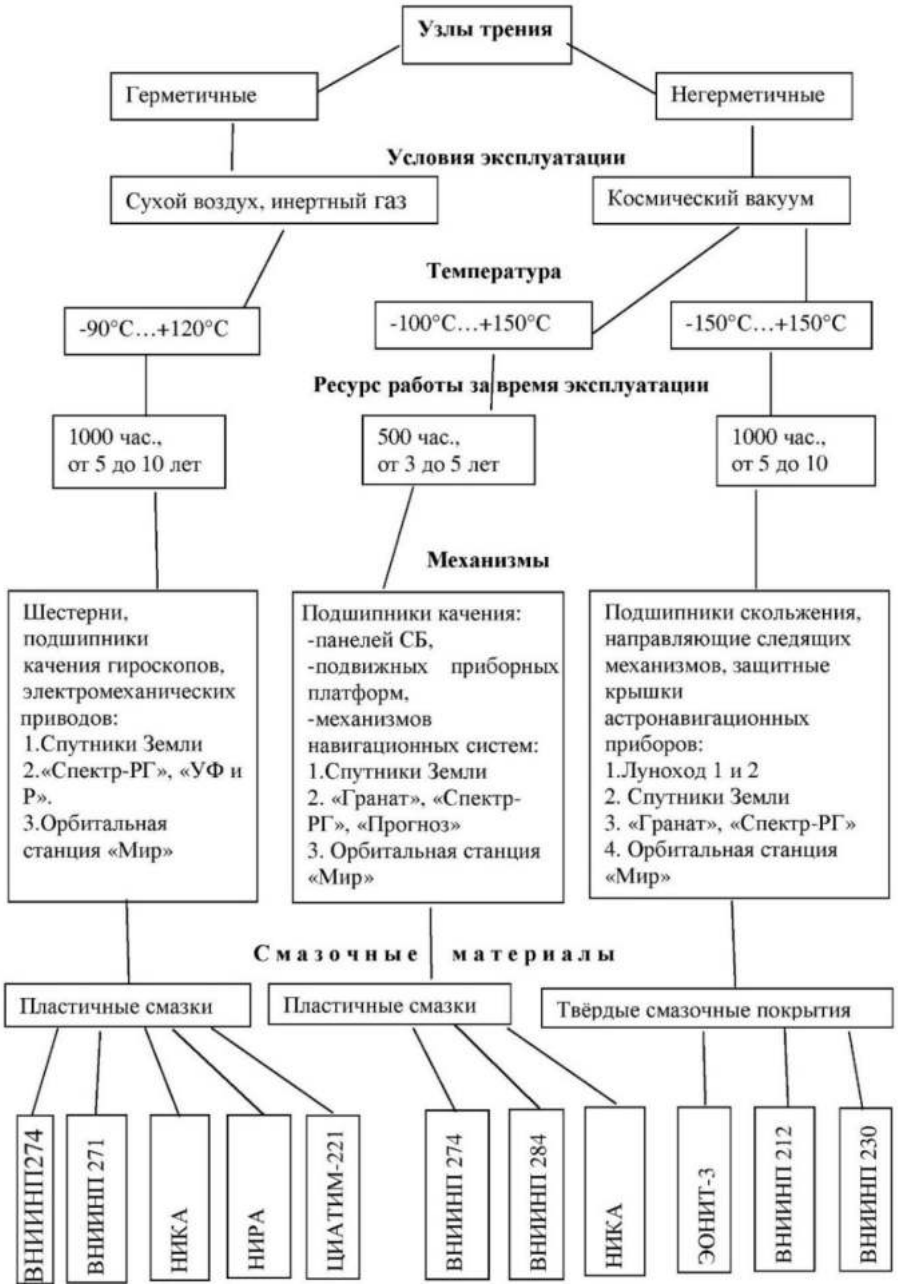


Рис. 1. Смазочные материалы в космических изделиях

Известно, что безотказность узла трения зависит от правильного выбора материалов пары трения и соответствующего смазочного материала, обеспечивающего постоянство заданных триботехнических характеристик в условиях эксплуатации.

Существует ряд способов обеспечения работоспособности узлов трения в глубоком вакууме, одним из которых является создание микроклимата в зоне узла трения. Это достигается герметизацией узла трения, механизма, прибора, что дает возможность применять обычные жидкие и пластичные смазки.

Новый этап развития космонавтики требует разработки перспективных конструкционных и смазочных материалов, которые обеспечат работоспособность и на орбите земли, и в дальнем космосе в течение длительного срока функционирования изделий. На рис. 1 приведена классификация материалов для узлов трения.

На рис. 1 приведены применения пластичных смазок и твёрдых смазочных покрытий в механизмах космических изделий в герметичных и негерметичных узлах, на воздухе и в космическом вакууме, в заданном диапазоне температур применения, при требуемом ресурсе работы и длительности эксплуатации. Показано, что пластичные смазки в пределе низких температур в космическом вакууме могут применяться до температур минус 100 °С, твёрдосмазочные покрытия в диапазоне от -150 °С до + 150 °С.

Вакуумные антифрикционные смазки

Вакуумные антифрикционные смазки предназначены для разнообразных узлов трения, эксплуатируемых в условиях высокого вакуума.

При понижении давления до 0,1 – 10 Па работоспособность смазочных материалов существенно меняется. Это обусловлено их испарением, изменением скорости срабатывания в зоне трения, ухудшением теплоотвода и другими причинами. В зависимости от состава срок службы смазки в вакууме снижается меньше или больше.

Отличительная особенность смазок, применяемых в глубоком вакууме – низкая испаряемость, работоспособность в отсутствии кислорода.

На рис. 2 показана зависимость момента трения и приведенного коэффициента трения от температуры при страгивании шарикоподшипника 6-60202 ЮТ с пластичными смазками НИКА и ЦИАТИМ-221 при нагрузке 1000 Н.

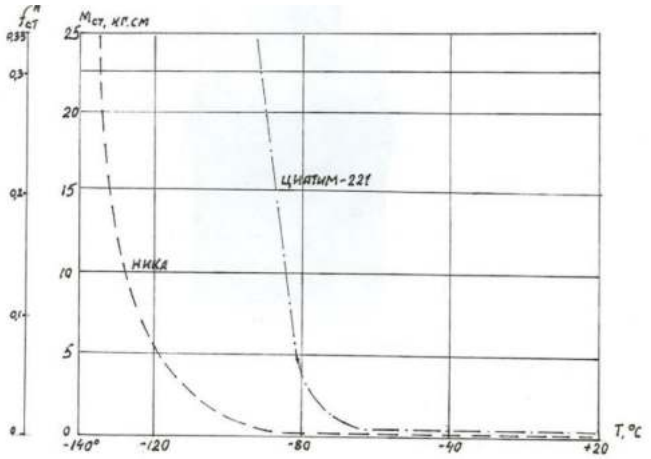


Рис. 2. Зависимость момента трения и приведенного коэффициента трения от температуры при страгивании шарикоподшипника 6-60202 ЮТ с пластичными смазками НИКА и ЦИАТИМ-221 при нагрузке 1000 Н

Следует обратить внимание на резкое повышение вязкости пластичных смазочных материалов со снижением температуры, в частности, даже для смазки НИКА при температурах ниже 80 °С сопротивление страгивания подшипника возрастает свыше 20 раз при приближении температуры в область минус 120 °С.

Твёрдосмазочные покрытия

Твердые смазочные покрытия на основе веществ, имеющих слоистую структуру, нанесенные на металлическую основу, получили широкое распространение в изделиях космической техники благодаря простоте их применения и эффективности работы узлов

трения с использованием этих покрытий. Нанесение таких покрытий осуществляется различными методами, в зависимости от условий работы узла трения. Наиболее часто используются твердосмазочные покрытия, имеющие в своем составе мелкодисперсный порошок MoS_2 – дисульфид молибдена – основной смазочный материал и связующее вещество: фенольные, эпоксидные, кремнийорганические смолы. Опытным путем установлено, что оптимальной толщиной является пленка 15 ± 5 мкм.

Достоинства твердосмазочных покрытий: малая испаряемость (связующего) в вакууме, низкий коэффициент трения, работоспособность в широком диапазоне температур (от - 200°С до + 350°С), удовлетворительная радиационная стойкость, работоспособность в широком диапазоне нагрузок, простота нанесения.

МДО-покрытия

Заслуживают внимания результаты испытаний покрытия микродугового оксидирования (МДО) с композиционным материалом на основе углерод-углеродного волокна ЭПАН. Испытания проводились по схемам торцевого нагружения кольцо-кольцо и вал-втулка вращательного движения в атмосфере воздуха. Длительность испытаний 120 минут. Обобщенные результаты испытаний по схеме кольцо-кольцо приведены в таблице 1.

Таблица 1

Материал	$P_{уд.}$ кг/см^2	V м/с	f
МДО-ЭПАН	0,4	0,2	0,006
		1	0,006
		2	0,08
	0,8	0,2	0,003…0,03
		1	0,006…0,003
		2	0,2→0,003
	1,2	0,2	0,03
		1	0,01→0,004
		2	0,04→0,002

Как видно из результатов испытаний коэффициент трения пары МДО-ЭПАН в большинстве случаев составляет величину менее 0,01, величины более 0,01 в режиме приработки поверхности.

Во всех рассмотренных случаях износ образца из материала ЭПАН был минимальным, износ покрытия МДО не наблюдался.

Алмазоподобные покрытия

Интересным методом упрочнения поверхностей трения на деталях из легких сплавов может быть рассмотрен метод нанесения алмазоподобных покрытий, которые значительно превосходят по износостойкости стальные, в том числе термообработанные и подвергнутые цементации поверхности. Технология нанесения таких покрытий позволяет наносить их на различные металлы, контролируя толщину наносимого слоя. Проведены оценочные испытания алмазоподобного покрытия нанесенного на стальной диск.

При трении в условиях атмосферы воздуха покрытия ВНИИНП-504 по алмазоподобному покрытию коэффициент трения был несколько ниже f = 0,09 … 0,1, чем в аналогичных условиях со стальной втулкой f = 0,1 … 0,12.

Керамические материалы

В последние годы появилась острая необходимость в применении для деталей подшипников качения керамических материалов. Это связано с поистине уникальным

комплексом их свойств, таких как лёгкость, прочность, износостойкость, химическая инертность, низкий коэффициент трения.

Чаще всего в подшипниковых конструкциях применяется нитрид кремния, изготовленный методом горячего прессования. Этот керамический материал благодаря своим сильным атомным, ковалентным связям обладает очень большой твердостью и повышенной износостойкостью, высокой сопротивляемостью к деформации при повышенных температурах и более низкой плотностью по сравнению, например, со сталью, что позволяет повысить рабочую температуру, быстроходность, долговечность и надежность.

Нитрид кремния обладает следующими свойствами: низкая плотность - 40 % от плотности стали; низкое тепловое расширение - 29 % от теплового расширения стали; высокий модуль упругости - 151 % упругости стали; высокая твердость - HV10 при 20 °C составляет 1700 по сравнению с 700 для подшипниковых сталей; низкое трение; выдерживает высокие температуры, не теряя твердости; стойкий к химическому воздействию и коррозии; немагнитный; электрический изолятор.

Горячепрессованный нитрид кремния в настоящее время обладает максимальной прочностью по сравнению с другими керамическими материалами и особенно перспективен в качестве материала для высоконагруженных подшипников качения.

Более высокий модуль упругости нитрида кремния в сравнении со сталью обеспечивает более высокую жесткость подшипника. Увеличение жесткости при статической нагрузке составляет до 10 %.

Нитрид кремния обладает низким коэффициентом трения, благодаря которому повышается износостойкость и обеспечивается меньший нагрев подшипников, когда они работают в условиях «масляного голодания». Потери мощности сокращаются на 10 %.

Меньшая по сравнению с металлами плотность керамики ведет к снижению центробежных сил при вращении шариков, что является решающим фактором при работе скоростных подшипников.

Испытания на трение и износ в открытом космосе

Для изучения проблем работоспособности подшипников на внешней стороне МКС, особенно при низких температурах, в рамках космического эксперимента «Триб космос» изготавливается специальный блок научной аппаратуры по испытанию подшипников качения на внешней стороне МКС, в том числе гибридных подшипников, испытания на трение и износ при скольжении различных конструкционных и смазочных материалов в условиях низких температур и условий открытого космического пространства. Такие эксперименты нигде в мире ранее не выполнялись.

Те космические эксперименты по изучению трения в открытом космосе, которые были проведены в нашей стране вокруг Луны [1] и позже на МКС [2], значительно уступают по своей научной и прикладной значимости космическому эксперименту «Триб космос».

В нём предусмотрены глубокие исследования закономерностей трения скольжения и износа, чего ранее никогда не делалось на орбите. Это позволит провести в реальных условиях испытания, которые невозможно в полной мере моделировать в вакуумных камерах на земле, и дать обоснованные рекомендации разработчикам перспективной космической техники.

Библиографический список

1. **Borovets, M.A.** Investigation of the Hard Lubrication Coatings in Open Space around the Moon, / M.A. Borovets, V.M. Yarosh, A.A. Moisheev // Tribotest Journal, Leaf Coppin Publishing Ltd, England, Vol. 1, No. 1, 2002, pp. 301-312.

2. **Jones, W.R.** Space Tribology / W.R. Jones, M.J. Jansen // NASA Technical Reports. -No TM-2000-209924.-40p.

УДК 621.891:22.753 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_41

И. А. Буяновский, д-р техн. наук (Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН)

УЧЕНИЮ О ГРАНИЧНОЙ СМАЗКЕ 99 ЛЕТ

Аннотация. *По случаю 99-летия публикации первой статьи о граничной смазке кратко рассмотрены работы исследователей, внесших значительный вклад в раскрытие механизма этого явления. Особое внимание уделено основателю учения о граничной смазке У.Б.Харди. Приведён краткий обзор экспериментальных исследований граничной смазки адсорбционным слоем.*

On the occasion of the 99th anniversary of the publication of the first article on boundary lubrication, the works of researchers who have made a significant contribution to the disclosure of the mechanism of this phenomenon are briefly reviewed. Special attention is paid to the founder of the boundary lubrication theory, W.B. Hardy. A brief overview of experimental studies of boundary lubrication by an adsorption layer is given.

Ключевые слова: граничная смазка, эффект сверхскольскости, латентный период трения, коэффициент трения, переходная температура, расклинивающий эффект, граничный слой, адсорбция, гомеотропная ориентация, жирные кислоты
Keywords: boundary lubrication, superlubricity, latent period of friction, coefficient of friction, boundary layer, transition temperature, wedging effect, homeotropic orientation, fatty acids.

Введение

К началу XX века, в основном, трудами таких учёных, как Н. П. Петров, Б. Тауэр и О. Рейнольдс, был установлен механизм смазки узлов трения в условиях, когда сопряжённые поверхности контактирующих деталей разделены сплошным слоем смазочной среды [1]. Однако при более жёстком режиме работы узлов трения смазочный материал (СМ), разделяющий трущиеся тела, выдавливается из зоны контакта, и методы направленного выбора СМ, обеспечивающие работоспособность узлов трения в этих условиях, в то время не были известны. В то же время было установлено, что растительные масла по трибологическим характеристикам превосходили масла на нефтяной основе.

Цель настоящей работы – в связи с наступлением в 2022 г. столетия первой публикации, заложившей основу создания учения о граничной смазке, дать краткий обзор экспериментальных исследований граничной смазки адсорбционным слоем.

Основополагающие работы У. Б. Харди. Значительный вклад в решение этой проблемы был внесён известным биологом, секретарём Лондонского Королевского общества по биологии, Уильямом Бейтом Харди (см. рис. 1). В процессе этих исследований он установил неизвестный ранее режим смазки, при котором «поверхности контактирующих тел расположены так близко друг от друга, что влияют непосредственно на физические свойства СМ» [2]. Такой режим смазки Харди назвал *граничным*; тончайший слой продуктов взаимодействия поверхностей трения контактирующих тел с активными компонентами СМ, который не выдавливался при контактных давлениях до 10^3 МПа, осуществляя при этом смазочное действие независимо от способа его нанесения, и который он рассматривал как мономолекулярный, он назвал *граничным слоем.*

Рис. 1. У.Б. Харди (1864 - 1934)

В 1922 г. он при условиях, исключающих реализацию жидкостной смазки (при высоких удельных нагрузках и малой скорости относительного перемещения трущихся тел, что обеспечивало реализацию граничного

режима смазки), провёл цикл измерений коэффициентов статического трения нагруженным ползуном (плоским или полусферическим) по пластинам из стекла, стали и висмута, смазанным соединениями гомологических рядов соответственно для нормальных парафинов, жирных кислот и спиртов [2]. Эти эксперименты показали, что на значения коэффициентов трения в данных условиях влияет как структура молекул смазочной среды, так и материал трущихся тел (см. рис. 2). При одинаковых молекулярных массах исследуемых смазочных сред минимальные коэффициенты трения наблюдались для жирных кислот, а максимальные – для парафинов. Во всех случаях коэффициенты трения представляют собой линейную убывающую функцию молекулярной массы для каждого гомологического ряда, причём эти зависимости для образцов из трёх исследуемых материалов параллельны (коэффициенты трения для образцов из висмута минимальны, из стекла – максимальны).

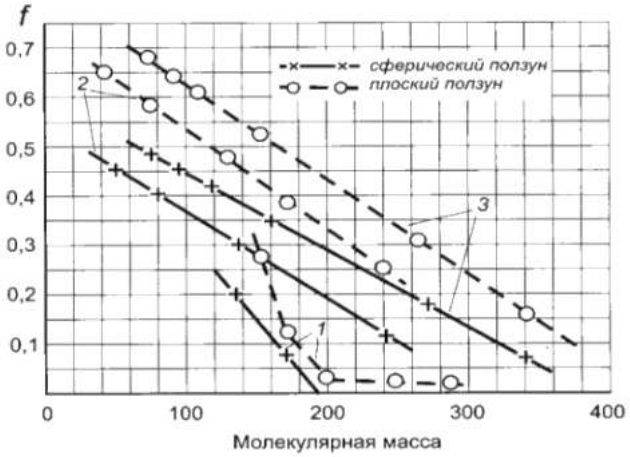


Рис. 2. Зависимость коэффициента статического трения стальных образцов от молекулярной массы (по Харди и Биркамшоу): *1* - жирных кислот; *2* - спиртов; *3* - парафинов (полусферический ползун – сплошная линия; плоский ползун – пунктир)

Как видно из рис. 2, углы наклона прямых, аппроксимирующих эти зависимости, для трёх сравниваемых гомологических рядов различны, но во всех случаях при дальнейшем росте молекулярной массы эти прямые (каждая в своей точке) пересекают абсциссу анализируемого графика, что должно свидетельствовать о равенстве нулю коэффициента трения в точках пересечения. Харди это подтвердил применительно к трению плоских образцов в среде рицинолеиновой кислоты, жидкой при температуре эксперимента. Плоский ползун, смазываемый этой жирной кислотой, приходит в движение при минимальном тангенциальном усилии (и даже может самопроизвольно перемещаться). Этот интересный результат Харди получил название «эффекта сверхскользскости» [2].

В дальнейшем (как видно из рис. 2) выяснилось, что следует говорить о достижении не нулевого, а всего лишь очень низкого (приблизительно 0,027) коэффициента трения при смазывании жирными кислотами с молекулярной массой более 190, то есть эти кривые должны иметь точки перегиба.

Продолжая экспериментальные исследования трения при граничной смазке, Харди установил, что при трении в поверхностно – активных средах наблюдаемый при пуске начальный коэффициент трения через определённое время снижается до определённого, постоянного для данного трибосопряжения уровня. Этот эффект, который Харди назвал *латентным периодом трения,* может длиться от нескольких минут до нескольких часов [3], причём его продолжительность сокращается при повышении температуры или при перемешивании. В инактивных средах такой эффект не наблюдается. В этой же статье приведены результаты исследования влияния смазочной способности двухкомпонентных смесей и прежде всего содержания активного компонента в инактивной среде на коэффициент трения при граничной смазке, что стимулировал интерес Харди к вопросу о влиянии степени заполнения поверхностей трения активными компонентами смазочной среды на коэффициент

трения при граничной смазке. Необходимо также обратить внимание на проведённое Харди первое в мире исследование влияния температуры трибосопряжения на антифрикционные свойства пар трения при граничной смазке [4]. Исследуя трение твёрдых тел, смазываемых углеводородами, при повышении температуры он обнаружил, что коэффициент трения при этом снижается до достижения температуры плавления углеводорода, после чего коэффициент трения резко повысился и практически не менялся при дальнейшем повышении температуры.

Анализируя совокупность полученных экспериментальных данных, Харди построил модель контакта (см. рис. 3), которая позволяет объяснить наблюдаемые им эффекты. На рабочие поверхности контактирующих тел 1 адсорбированы гомеотропно ориентированные молекулы смазочной среды 2, образуя «молекулярный ворс». Сдвиг по поверхности 3 не требует больших усилий. Чем больше длина молекул, образующих граничный слой, тем больше расстояние между контактирующими поверхностями и тем слабее взаимодействие между силовыми полями твёрдых тел и тем меньше будут потери на трение. Именно по этой причине при определённой длине молекул углеводородов будет проявляться эффект сверхскользкости (см. рис. 2). Наличие же латентного периода граничной смазки Харди считает убедительным доказательством того, что молекулы в граничном слое имеют гомеотропную ориентацию. Часть молекул жирных кислот адсорбируются сразу карбоксильной группой на поверхностях трения, а часть адсорбируются на этих поверхностях метильным радикалом, вследствие чего их положение неустойчиво, и они на протяжении латентного периода переворачиваются и занимают устойчивое положение, то есть карбоксильной группой к поверхности трения, что и является причиной снижения коэффициента трения. Молекулы же нормальных парафинов симметричны, так что такая проблема здесь не возникнет.

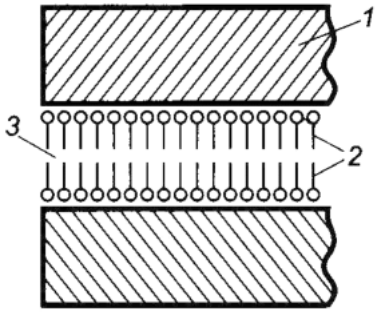


Рис. 3. Модель контакта при граничной смазке (по Харди)

Исследования кембриджских трибологов

Своими работами Харди открыл для последующих исследователей процесса граничной смазки широкое поле деятельности. Такие же сотрудники Кембриджского университета, каким был при жизни У. Б. Харди, Ф. П. Боуден и его ученик и многолетний соавтор Д. Тейбор уточнили предложенную Харди модель контакта при граничной смазке (см. рис. 4), в которой учли установленный ими ранее дискретный характер контакта твёрдых тел. Как видно из рис. 4, при тяжёлых режимах граничной смазки по вершинам отдельных неровностей осуществляется непосредственный металлический контакт сопряжённых деталей, который локализуется граничным слоем адсорбционного происхождения [5].

К другим успехам кембриджской трибологической школы следует отнести определение температуры разрушения граничного слоя (так называемой *переходной температуры*) путём нагрева пары трения и окружающего его слоя СМ от внешнего источника тепла при постоянной нагрузке и постоянной и очень малой скорости относительного перемещения трущихся тел, чтобы минимизировать фрикционный нагрев в трибологическом контакте, и температура в контакте контролировалась только внешним нагревом. Как видно на рис. 5, при превышении переходной температуры наблюдается

повышение коэффициента трения, сопровождаемое скачкообразными его изменениями [6]. Дальнейшие исследования показали, что для чистых углеводородов, спиртов, кетонов и амидов переходная температура была равна температуре их плавления. Для жирных кислот и эфиров переходные температуры существенно превышали температуры плавления, причём эти температуры возрастали с увеличением длины радикала исследуемых кислот. Эти результаты были объяснены тем разрушением граничного слоя вследствие его дезориентации и десорбции его молекул.

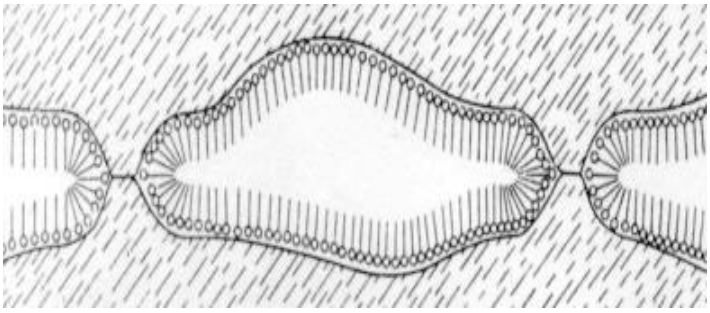


Рис. 4. Модель контакта при граничной смазке (по Боудену)

При этом представители школы Боудена были уверены в том, что «высокая эффективность смазочного действия может наблюдаться только в том случае, если на поверхности трения имеются монослои в твёрдом агрегатном состоянии». Однако в это же время уже проводилось изучение строения граничных слоёв, образующихся на твёрдой подложке с помощью доступных тогда инструментальных методов. Так, Брэгг и Трилля использовали рентгеновские методы исследования, Мюризон и Эндрю – методы электронной дифракции. Во всех случаях результаты показали, что граничные плёнки представляют собой ориентированные многослойные образования. Так Трилля, применивший рентгеновский структурный анализ, установил, что нанесённый на поверхность пластины граничный слой состоит из 400-600 элементарных «пластин», каждая из которых состоит из двух молекулярных слоёв, причём в каждом слое молекулы расположены перпендикулярно поверхности раздела слоёв, и чем длиннее цепь, тем прочнее связь между молекулами в слое вследствие сил когезии. Ориентация молекул в слое происходит под воздействием силового поля металла [7].

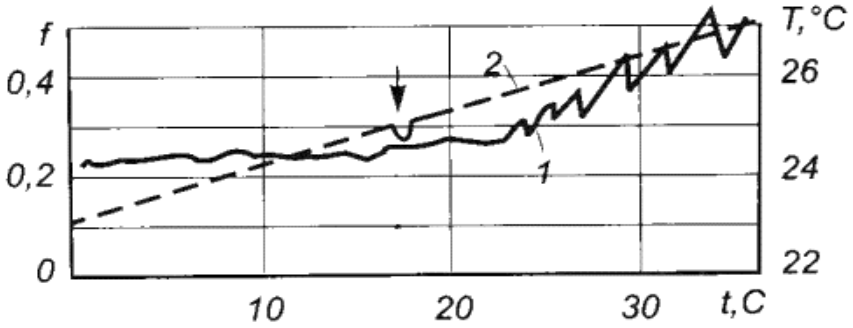


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения f образцов из мягкой стали со смазкой дифениламином (1) и повышение температуры Т (2) от времени испытания t. Стрелкой показана температура плавления смазочного материала (по Тейбору)

Исследования механических характеристик граничных слоёв

Следует отметить, что Боуден и Тейбор в своих моделях, как и Харди, рассматривали граничный слой как мономолекулярный. В отличие от них, Б. В. Дерягин полагал, что «монослои не могут служить достаточной защитой против износа. Причину понижения износа надо искать в буферном действии полимолекулярных слоёв [8]». Он установил, что тонкие

смазочные слои оказывают заметное расклинивающее действие (эффект Дерягина). Иначе говоря, смазочная плёнка, заключённая между контактирующими поверхностями, сопротивляется утоньшению, развивая определённое противодавление. Введение в смазочную среду сильных ПАВ увеличивает расклинивающий эффект. Его величина определяется расстояниями между сжимаемыми поверхностями, резко возрастая с его уменьшением. Согласно [9], представление о расклинивающем эффекте имел уже Харди, но он не смог его оценить количественно.

Исследуя вязкость граничных слоёв разработанным им методом сдувания. Б. В. Дерягин установил, что граничный слой имеет чёткую границу раздела с объёмом жидкости, то есть граничный слой находится в особом агрегатном состоянии и имеет свойство особой фазы, отличной от объёма. Тем же методом Б. В. Дерягин установил, что адсорбированные слои ПАВ способны вызвать в среде неполярных углеводородах появление ориентированных граничных слоёв (рис. 6). Это опять-таки ответ на вопросы, которые в своё время ставил Харди.

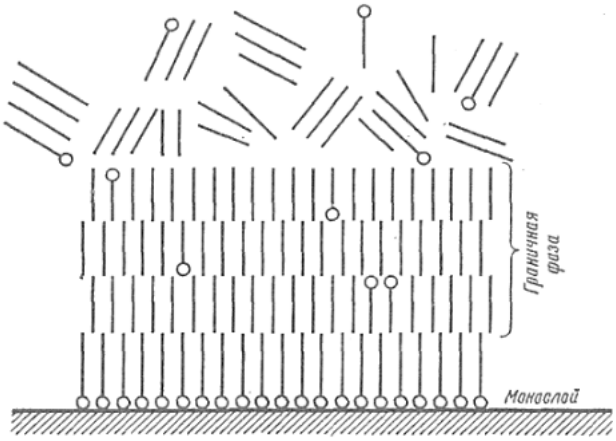


Рис. 6. Модель граничного слоя для раствора ПАВ в инактивной среде (по Б.В. Дерягину)

Как показал Б. В. Дерягин, «связь между ориентацией адсорбированных молекул и коэффициентом трения носит взаимный характер, и процесс трения способен менять ориентацию адсорбированных молекул ПАВ» [8].

Значительный вклад в развитие учения о граничной смазке внёс А. С. Ахматов [10]. Исследуя физическое состояние граничного слоя, он пришёл к заключению, что его можно рассматривать как квазитвёрдое, и квазикристаллическое тело, также обладающее упругостью формы. В 1960 г. он провёл фантастический эксперимент, в результате которого измерил упругие константы граничных смазочных слоёв. Поскольку толщина каждого индивидуального граничного слоя слишком мала, чтобы оценить его механические характеристики, А. С. Ахматов и его соавтор Л. В. Кошлакова пошли по пути аддитивного сложения деформаций стопы тонких металлических пластин, на каждую из которых наносили граничные слои заданной толщины. Анализ результатов деформирования получившейся стопы слоёв позволил установить, что граничные слои обладают истинной упругостью формы, что для них выполняется закон Гука. Коэффициент Пуассона для граничных слоёв близок к 0,5, то есть граничные слои стеарата кальция подобно резине. Дальнейшее исследование позволило А. С. Ахматову установить, что нанесение на образцы 500 молекулярных слоёв полностью экранирует силовое поле твёрдого тела. Обработка данных, полученных при проведении эксперимента, позволили оценить удельные силы притяжения для ряда одноименных пар металлов, а также, используя трёхчленную формулу, полученную путём модификации двухчленной формулы Дерягина, получить значения как удельных сил притяжения для некоторых одноименных металлов, так и удельной силы притяжения граничных слоёв.

Влияние материалов трущихся тел

Материалы сопряжённых деталей узлов трения, функционирующих в режиме граничной смазки, оказывают заметное влияние на трибологические характеристики этих трибосопряжений. Это показал Харди применительно к трём материалам (стали, стеклу и висмуту) в трёх смазочных средах [2], это показали Боуден и Тейбор применительно к двадцати трём чистым металлам и сплавам при смазывании минеральным маслом и лауриновой кислотой [5], это показали Матвеевский и его ученики применительно к трению стального шарика по сплавам на основе меди и сплавам на основе алюминия при смазывании инактивным маслом с присадкой стеариновой кислоты [11]. Можно также показать, что значительное влияние на антифрикционные свойства смазочных материалов при граничной смазке оказывают также покрытия, причём заметно разнится антифрикционные характеристики смазочных масел не только покрытий различными материалами, но и покрытий одним материалов, но нанесённым по различным технологиям. На рис. 7 приведены зависимости коэффициентов трения стали по алмазоподобным углеродным покрытиям, не содержащим водорода. Одно из покрытий аморфное, второе монокристаллическое, имеющее свойства ориентанта. В качестве смазочного материала используется инактивное вазелиновое масло ВМ.

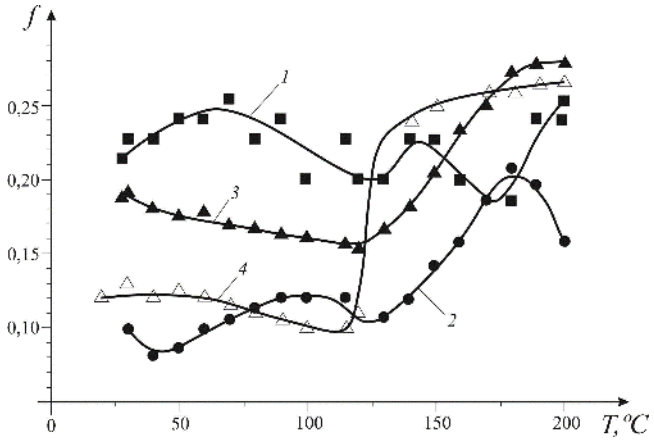


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения f от температуры Т испытаний в среде инактивного масла ВМ для пар трения: *1*-сталь по АУП; *2* - сталь по МКУ; *3* – сталь по стали; *4* – сталь по стали в среде ВМ+1% олеиновой кислоты.

Как видно из рисунка, антифрикционным свойствам и по температурной стойкости смазочных сред при трении, стали с монокристаллическим углеродным покрытием МКУ), превосходят стали без покрытия и стали с аморфным углеродным покрытием, и даже сталь без покрытия, но в среде ВМ, но с присадкой 1% олеиновой кислоты. Следовательно, изменяя структуру углеродного покрытия, можно влиять на фрикционные свойства трущихся пар. Монокристаллическое углеродное покрытие повышает смазочные свойства граничных слоев, и, соответственно, способствует снижению трения, а аморфное углеродное покрытие – повышает фрикционные свойства смазанного сопряжения [12], что вполне отвечает концепции У. Б. Харди.

Заключение

В текущем году исполняется 99 лет с тех пор, как Уильям Бейт Харди ввёл представление о граничной смазке и о граничном состоянии вещества. 99 лет с тех пор, когда Уильям Б. Харди написал в статье, прославившей его имя и сделавшей его основателем совершенно нового направления исследований: «Существует, однако, другой вид смазки, при котором поверхности трения так близки друг от друга, что влияют непосредственно на физические свойства смазочного материала. <…> Трение зависит не только от смазочного

материала, но и от химической природы границ твёрдых тел. Граничная смазка так сильно отличается от совершенной, что заставляет предположить наличие разрыва между двумя состояниями».

Не прошло и четырёх лет, как великий Резерфорд, при вручении сэру У. Б. Харди королевской медали за научные заслуги сказал, что «впервые в истории науки зависимость трения и смазки от структуры и молекулярной ориентации поверхностных плёнок и связь силовых полей молекул с их структурой и полярностью объяснены в серии прекрасных и очень важных открытий. Все эти работы характеризуются оригинальностью взглядов и творческим воображением, свойственным гению».

Едва ли Резерфорд польстил сэру Уолтеру. Гарди был поистине великим учёным. Не случайно в числе его последователей такие блестящие учёные, как А. С. Ахматов, Ф. П. Боуден, Б. В. Дерягин, А. Камерон, Р. М. Матвеевский, П. И. Ребиндер, Д. Тейбор. Просматривая работы этих специалистов, я не могу отвязаться от представлений, что все они дружно и успешно работают по программе, написанной Харди. Великолепный экспериментатор, замечательный методист, Харди был истинным учёным, изучавшим самый тяжёлый режим работы смазанных узлов трения, при котором только тончайший граничный слой, состоящий из продуктов взаимодействия поверхностей трения защищает узлы трения от интенсивного износа, заедания и выхода из строя.

Библиографический список

1. **Dowson, D.** History of Tribology / D. Dowson / London – NY: Longman. 1979 – 677 p.

2. **Hardy, W.B.** Boundary lubrication – the latent paraffin series / W.B. Hardy, I. Doubleday // Proc. Roy Soc., Lond. A, 1922. 100. – P. 550 – 574.

3. **Hardy, W.B.** Boundary lubrication – the latent period and mixtures of two lubricants / W.B. Hardy, I. Doubleday // Proc. Roy. Soc., London, A, 1923, 104. – P. 25 – 39.

4. **Hardy, W.B.** Boundary lubrication – the temperature coefficient / W.B. Hardy, I. Doubleday // Proc. Roy Soc., Lond. A, 1922. 101. – P. 487 – 492.

5. **Боуден, Ф.П.** Трение и смазка / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор // М.: Машгиз. 1960. – 151 с.

6. **Tabor, D.** Desorption or surface melting of a lubricant film? / D. Tabor // Nature. 1941. Vol.147. № 3733. – P. 609.

7. **Буяновский, И.А.** Граничная смазка: этапы развития трибологии / И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, Т.Н. Шабалина // М.: ГУП Изд. Нефть и газ. 2002. – 230 с.

8. **Дерягин, Б.В.** Современные проблемы граничного трения / Б.В. Дерягин // В кн.: Труды Третьей Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. В 3-х томах. Т. 2. М: АН СССР. 1960. – С. 115-119.

9. **Дерягин, Б.В.** Проблемы граничной смазки / Б.В. Дерягин // В кн.: Повышение качества и применение смазочных материалов. М.: Гостоптехиздат. 1957. – С. 5 – 17.

10. **Ахматов, А.С.** Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов // М.: Физматгиз. 1963. – 472 с.

11. Матвеевский, Р.М. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки / Р.М. Матвеевский, И.А. Буяновский, О.В. Лазовская // М.: Наука. 1978 – 192 с.

12. **Буяновский, И.А.** Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке: ч. 1. Структура, методы испытаний, смазка адсорбционными слоями / И.А. Буяновский, М.М. Хрущов, В.Д. Самусенко / Материаловедение. 2021. № 9. - С. 3-18.

УДК 629.471 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_48

В.Н. Пустовой, И.И. Лакин, канд. техн. наук (АО «Трансмашхолдинг»)

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВОВ В АО «ТРАНСМАШХОЛДИНГ»

Аннотация. *В статье описан научно-практический опыт создания автоматизированной системы управления надёжностью локомотивов одного из крупнейших производителей железнодорожного подвижного состава в мире и крупнейшего в России АО «Трансмашхолдинг». Система строится как двухуровневая с первичным расследованием в сервисном предприятии и вторичным расследованием на заводе-изготовителе. Все процессы управления в настоящее время автоматизируются.*

The article describes the scientific and practical experience of creating an automated control system for the locomotives reliability in one of the largest locomotives construction holdings in the world and the largest in Russia JSC «Transmashholding». The system is built as a two-level with a primary investigation in the service enterprise and a secondary investigation at the manufacturer. All management processes are currently being automated.

Ключевые слова: подвижной состав железных дорог, сервисное обслуживание, надёжность, качество, автоматизация управления.
Keywords: railway rolling stock, service, reliability, quality, management automatization.

Акционерное общество «Трансмашхолдинг» (ТМХ) по объёму выпускаемого железнодорожного подвижного состава и оборудования транспортного машиностроения является четвёртой в мире компанией и первой в России [1]. Основной покупатель продукции ТМХ – ОАО «Российские железные дороги» (РЖД). Лидером электровозостроения в ТМХ является Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ), выпускающий грузовые электровозы постоянного и переменного тока с приводом постоянного тока (серии Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К, 2ЭС4К, 3ЭС4К) и пассажирские электровозы переменного тока серии ЭП1М. Налажен выпуск локомотивов с асинхронным приводом ЭП20 и 2ЭС5С. Лидером тепловозостроения в ТМХ является Брянский машиностроительный завод (БМЗ), выпускающий грузовые магистральные тепловозы серий 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25К2М и маневровые тепловозы серии ТЭМ18ДМ. Лидер дизелестроения ТМХ – это Коломенский завод (КЗ), выпускающий также пассажирские электровозы постоянного тока ЭП2К и тепловозы ТЭП70БС. Тверской вагоностроительный завод (ТВЗ), наряду с производством вагонов, наладил выпуск городских электропоездов ЭГ2ТВ «Иволга». Демиховский машиностроительный завод (ДМЗ) производит пригородные электропоезда постоянного и переменного тока ЭП2Д и ЭП3Д. Метровагонмаш производит вагоны метро для метрополитенов и рельсовые автобусы РА-3 для железных дорог. В состав ТМХ входят и другие заводы, выпускающие оборудование для подвижного состава [1].

ТМХ не только выпускает подвижной состав, но и берёт на себя его сервисное сопровождение согласно контракту жизненного цикла (КЖЦ). Для сервисного обслуживания локомотивов создана компания «ЛокоТех», для обслуживания вагонов метро – «Метровагонмаш-Сервис». Планируется создание сервисных компаний для других видов выпускаемого подвижного состава. Поставка сложной техники по контракту жизненного цикла с организацией сервисного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) сложных систем – это мировой тренд [2 - 7]. В России утверждён Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» (№ 44-ФЗ от 05.04.2013), согласно которому КЖЦ «является долгосрочным (более 20 лет) соглашением о разработке, изготовлении, поставке,

обслуживанию, ремонту и утилизации объекта закупки на финансовых условиях согласно договору». ТМХ через официального агента по реализации локомотивов ЗАО «Рослокомотив» впервые в отечественной практике заключил с ОАО «РЖД» контракт жизненного цикла на поставку всех выпускаемых в настоящее время локомотивов. Главное отличие сервисного обслуживания от ранее существовавшей системы ТОиР – это отказ от бюджетной формы его оплаты: выручка сервисных компаний определяется полезным пробегом локомотивов.

Сервисное обслуживание локомотивов существует в ОАО «РЖД» с середины 2014-го года. Отличие вновь заключаемых КЖЦ – это более чёткие и жёсткие требования к качеству и надёжности подвижного состава, строгие требования к уровню обслуживания, известные в мире как «Service Level Agreement» (SLA). Первые сервисные договоры предполагали обеспечение SLA на ранее достигнутом уровне. В КЖЦ требуется обеспечение показателей надёжности на уровне технических условий (ТУ) на локомотив и основные виды его оборудования. За несоблюдение SLA по надёжности согласно ТУ в КЖЦ предусмотрены штрафные санкции, понижающие коэффициенты и другие меры. Новые требования SLA предъявляют новые требования к системе ТОиР и к системе управления качеством эксплуатации подвижного состава: выполнить требования КЖЦ невозможно без кардинального улучшения конструкции, качества изготовления, создания новой системы технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР). В результате перехода на КЖЦ бизнес ТМХ состоит из двух равноправных составляющих: производства и сервисного обслуживания.

Задача управления надёжностью всегда предполагала поиск оптимума между начальной стоимостью изделия и стоимостью его обслуживания и ремонта. В литературе хорошо известна «Кривая оптимума Генити Тагути» (Рис.1) [2], используемая при решении задачи «Инжиниринг качества». Кривая отображает функцию потерь, состоящую из двух встречных процессов: с ростом конструктивной надёжности изделия, растёт его стоимость, но уменьшается стоимость жизненного цикла. И наоборот [2, 3]. Поиск оптимального соотношения цены изделия и стоимости его жизненного цикла связан с необходимостью обрабатывать и анализировать большой объём данных об эксплуатации и ТОиР: необходимо создание автоматизированной системы менеджмента качества, мониторинга жизненного цикла изделия с комплексной обработкой большого потока информации. В ТМХ задача решается в рамках автоматизации управления жизненным циклом подвижного состава, управления качеством его эксплуатации и безопасностью движения.

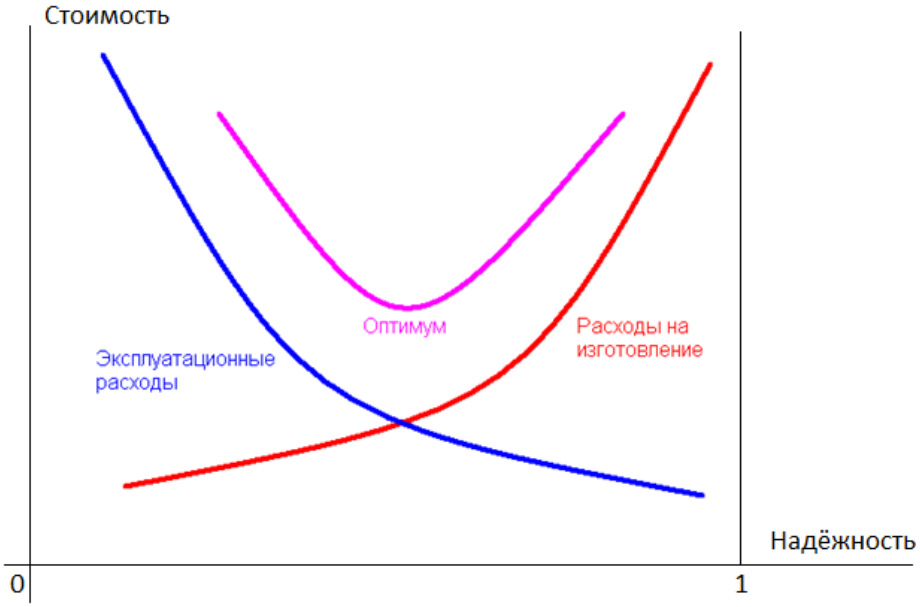


Рис. 1. Кривая оптимума затрат Генити Тагути

Необходим комплексный учёт отказов в эксплуатируемом парке, неплановых ремонтов, ремонтов оборудования в гарантийный период и сверхцикловых работ при плановых видах ТОиР. Необходимо создание автоматизированной системы управления (АСУ) жизненного цикла подвижного состава (ЖЦ), которая бы выполняла многофакторный анализ собранной в системе управления базами данных (СУБД) информации.

В ТМХ в связи с переходом на контракт жизненного цикла (КЖЦ) при поставке локомотивов в ОАО «РЖД» разработаны регламенты взаимодействия сервисной компании «ЛокоТех», локомотивостроительных и локомотиворемонтных заводов, поставщиков оборудования и комплектующих при расследовании и определении первопричин неисправностей, нарушений безопасности движения поездов. Регламенты призваны обеспечить выполнение SLA КЖЦ (Рис.2) [6].

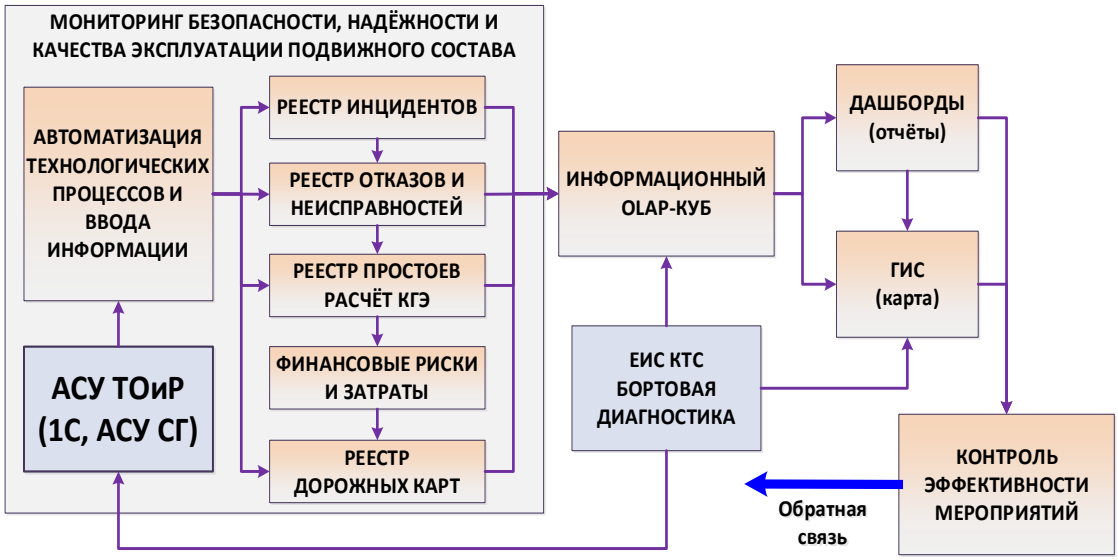


Рис.2. Автоматизированный контроль качества эксплуатации локомотивов

Оперативный мониторинг технического состояния локомотивов осуществляет департамент по контролю за безопасной эксплуатацией подвижного состава ООО «ЛокоТех» и сервисные локомотивные депо (СЛД) «ЛокоТех-Сервис». Допущенные отказы, неплановые ремонты, события нарушения безопасности, сверхцикловые работы, рекламации и превышение простоя на неплановом ремонте и плановом сервисном обслуживании (ТОиР) фиксируются в реестрах разнесения ответственности в информационной системе на базе пакета программ 1С. В сервисных локомотивных депо производится первичное расследование с разнесением ответственности между эксплуатирующим локомотивы ОАО «РЖД» и группой компаний Трансмашхолдинг (ТМХ) с формированием соответствующего пакета документов и регистрацией их в базе данных.

Деятельность ТМХ разбита на продуктовые дивизионы: Локомотивный, городской рельсовый транспорт, пассажирские вагоны локомотивной тяги, пригородные поезда, энергетическое оборудование и др. Продуктовый дивизион определяет ответственное предприятие, которое исследует первопричины отказов, предлагает план мероприятий с определением их стоимости для повышения качества продукции.

На системные случаи формируются дорожные карты первоочередных и корректирующих мероприятий для устранения несоответствий, приведших к отказу и неисправности оборудования подвижного состава. Формируются динамические графики по достижению целевого показателя надёжности. Заключительный этап – анализ эффективности мероприятий. Таким образом, работа в ТМХ построена в соответствии с принципом постоянного улучшения Эдварда Деминга, известного как «Цикл PDCA» (Plan-Do-Check-Act) [4 - 7].

Описанный цикл постоянного улучшения требует сбора и обработки очень большого объёма первичной информации (Big Data) и данных по первичному и вторичному расследованиям, рекламационно-претензионной работе с поставщиками покупных и комплектующих изделий. Данная информация из различных источников информации учитывается в соответствующих реестрах разнесения ответственности за допущенные несоответствия согласно утверждённым регламентам.

Расследование допущенного несоответствия (инцидента) начинается с формирования чек-листа документов в дирекции контроля качества эксплуатации подвижного состава на линейном сервисном предприятии с разнесением ответственности между Эксплуатирующей организацией и АО «ТМХ». Более детальное разнесение ответственности между предприятиями АО «Трансмашхолдинг» производят т.н. «продуктовые дивизионы» ТМХ. Определяется виновная сторона, которая производит вторичное комиссионное расследование с разнесением ответственности между функциональными блоками АО «Трансмашхолдинг», определением коренных причин. По установленным коренным причинам отказа разрабатывается и утверждается дорожная карта.

Реализация описанного процесса невозможна без его автоматизации с использованием современных информационных технологий. Создаётся сквозная технология автоматизированного управления (Рис. 3) [2 – 7]. Происходит объединение в едином информационном пространстве всех уровней управления ТМХ. В процессе задействованы департамент ТМХ по контролю безопасной эксплуатации подвижного состава, Ситуационно-аналитический центр мониторинга и реагирования ТМХ, продуктовые дивизионы ГК ТМХ, производственные предприятия подвижного состава (НЭВЗ, БМЗ, КЗ, ТВЗ, ДМЗ, Метровагонмаш), поставщики оборудования, сервисные компании, заводы Желдорреммаш, обособленные подразделения ТМХ инжиниринг. В результате обеспечено единое информационное пространство для формирования достоверной и своевременной аналитической и интерактивной информации об эксплуатации подвижного состава с целью повышения надёжности подвижного состава, снижения стоимости его жизненного цикла, сокращения финансовых рисков, повышения конкурентоспособности продукции ТМХ.

В процессе эксплуатации локомотивов (блок 1, Рис. 3) согласно руководству по эксплуатации и руководству по ремонту каждой серии локомотивов в соответствии с КЖЦ осуществляется техническое обслуживание и ремонт локомотивов (ТОиР) (блок 2). В ТОиР внедрена комплексная автоматизированная система управления (АСУ) технологическими процессами ТОиР АСУ «Сетевой график» (АСУ СГ) [6] на базе пакета программ 1С. В диагностической карте АСУ СГ фиксируются все замечания по техническому состоянию локомотивов из всех доступных источников информации: бортовой журнал локомотива формы ТУ-152, автоматизированные рабочие места расшифровки диагностических данных бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ) локомотивов [3 – 5], деповские переносные и стационарные системы диагностирования, результаты визуальной приёмки локомотива на ремонт и другие источники информации. Дополнительная информация поступает автоматически из информационных систем ОАО «РЖД» [4, 5].

Согласно набору планово-предупредительных работ (шаблонов ТОиР) и назначенным сверхцикловым работам составляется индивидуальный линейный график ТОиР каждой секции локомотива, назначаются нормированные работы, выдаются материалы и запасные части со склада, заменяются отдельные виды оборудования и др. Все данные автоматизировано регистрируются в АСУ СГ.

По комплексным данным АСУ СГ (блок 2) силами дирекции по контролю качества эксплуатации подвижного состава (блок 3) осуществляется мониторинг технического состояния и ТОиР (блок 4), в результате чего формируется дополнительная информации по надёжности локомотивов, которая разбита на несколько групп: реестр инцидентов (оперативное расследование резонансных случаев с локомотивами, блок 4.1), реестр отказов и неисправностей (расследование причин возникновения отказов и сверхцикловых работ, блок 4.2), реестр простоев (контроль простоя локомотива по операциям линейного графика с

расчётом коэффициента готовности к эксплуатации, блок 4.3). По системным отказам и выявленным проблемам ТОиР формируются дорожные карты (блок 4.4).

В результате описанной комплексной работы формируется информация для анализа (блок 4.5), которая автоматически (блок 5) передаётся в специально создаваемый информационный OLAP-куб (блок 6), по данным которого формируется комплекс BI-отчётов (дашбордов, блок 7) [8]. Для визуального оперативного поиска мест возникновения проблем используется геоинформационная система (ГИС). Именно дашборды и ГИС являются информационной основой анализа состояния надёжности подвижного состава, принятия корректирующих мероприятий (блок 9).

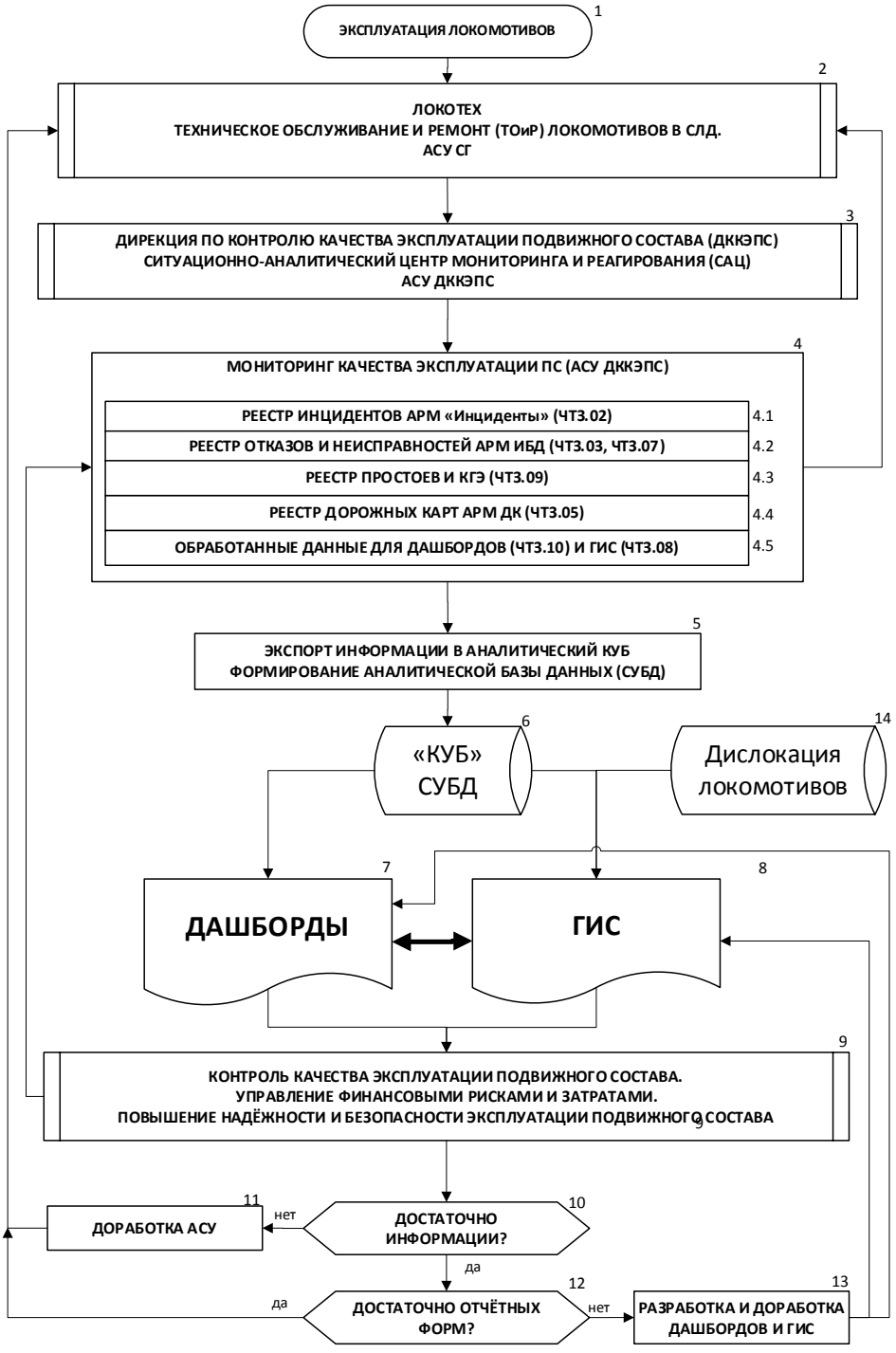


Рис. 3. Блок-схема бизнес-процесса управления качеством эксплуатации локомотивов

Если в процессе управления надёжностью локомотивов возникает необходимость в разработке новых информационных форм (блок 12), то производится их разработка (блок 13).

Если для дашбордов недостаточно информации (блок 10), то производится доработка АСУ (прежде всего – АСУ СГ, блок 11) [3].

Таким образом, в АО «Трансмашхолдинг» разработана и эксплуатируется комплексная автоматизированная система управления надёжностью выпускаемого рельсового подвижного состава, позволяющая постоянно повышать его качество и эффективность эксплуатации.

Библиографический список

1. Официальный сайт Трансмашхолдинг (ТМХ) [Электронный ресурс]. **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.**.

2. Автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ). Концепция ТМХ-Сервис [Текст] / К.В. Липа [и др.] / М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2012. – 160 с.

3. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика [Текст] / К.В. Липа [и др.] / М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. – 212 с.

4. **Лакин, И.И.** Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов [Текст] дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / И. И. Лакин / М., МИИТ, 2016 – 195 с.

5. **Аболмасов, А.А.** Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / А.А. Аболмасов / М.: МИИТ, 2017 – 180 с.

6. **Пустовой, И.В.** Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов [Текст] дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / И.В. Пустовой / Омск: ОмГУПС, 2018, – 183 с.

7. **Хромов, И.Ю.** Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов [Текст] дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / И.Ю. Хромов / М.: РУТ, 2021 г. – 181 с.

8. **Лакин, И.К.** Инкапсуляция статистических методов управления в информационные системы Локотех [Текст] / И.К. Лакин, С.Л. Лянгасов, А.А. Аболмасов // Труды третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава». – Омск: ОмГУПС, 2015. – С. 14-21.

СЕКЦИЯ 1.
Инновационное развитие транспортного комплекса Российской Федерации

УДК 656.07 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_54

В.В. Алабина (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНФОРМАЦИИ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. *В статье выполнен анализ развития складской недвижимости в России. Выявлены основные проблемы традиционных транспортно-складских комплексов, которые указали на то, что с появлением постоянно растущего сектора электронной коммерции, потребности в более быстром реагировании и необходимости управлять большим количеством складских единиц с меньшим количеством ошибок значительно увеличились. Установлено, что одним из направления решения проблем транспортно-складских систем может быть обеспечено цифровой трансформацией (цифровизацией) логистических и транспортно-складских операций, а именно создание умных складов, которые позволят автоматизировать традиционные складские функции.*

The article analyzes the development of warehouse real estate in Russia. The main problems of traditional transport and warehouse complexes were identified, which indicated that with the emergence of an ever-growing e-commerce sector, the need for faster response and the need to manage more warehouse units with fewer errors has increased significantly. It has been established that one of the directions for solving the problems of transport and warehouse systems can be provided by digital transformation (digitalization) of logistics and transport and warehouse operations, namely, the creation of smart warehouses that will automate traditional warehouse functions.

Ключевые слова: транспорт, транспортно-складской комплекс, проблемы, грузовые перевозки, цифровизация.

Keywords: transport, transport and warehouse complex, problems, freight transportation, digitalization

Важной составляющей эффективного и комплексного развития железнодорожного транспорта на отечественном и международном рынках транспортных услуг является развитие логистической деятельности. В связи с этим цель развития российской и мировой экономик – обеспечение доступности и качества транспортно-логистических услуг в области грузовых перевозок на уровне потребностей развития экономики страны. Складские и транспортные звенья нуждаются во взаимодействии и координации на новых принципах единой технологии работы с учетом автоматизации и цифровизации. Представлены основные направления развития доступности и качества логистических услуг (рис. 1).

Транспортно-складской комплекс – это часть станционной территории, на которой находится комплекс сооружений и устройств, предназначенный для приема, погрузки, выгрузки, выдачи, сортировки и временного хранения грузов, а также для непосредственной перегрузки их с одного вида транспорта на другой. Складской комплекс являются важными элементом логистической отрасли. Транспортно-складской комплекс подразделяется на три уровня управления: управление поступлением товаров, управление хранением товаров и управление распределением товаров [1].

Массовое производство товаров подтверждает необходимость наращивать специализированные склады, а также переоснащать существующие склады в интеллектуальные транспортно-складские комплексы, расположенные вблизи транспортных узлов.

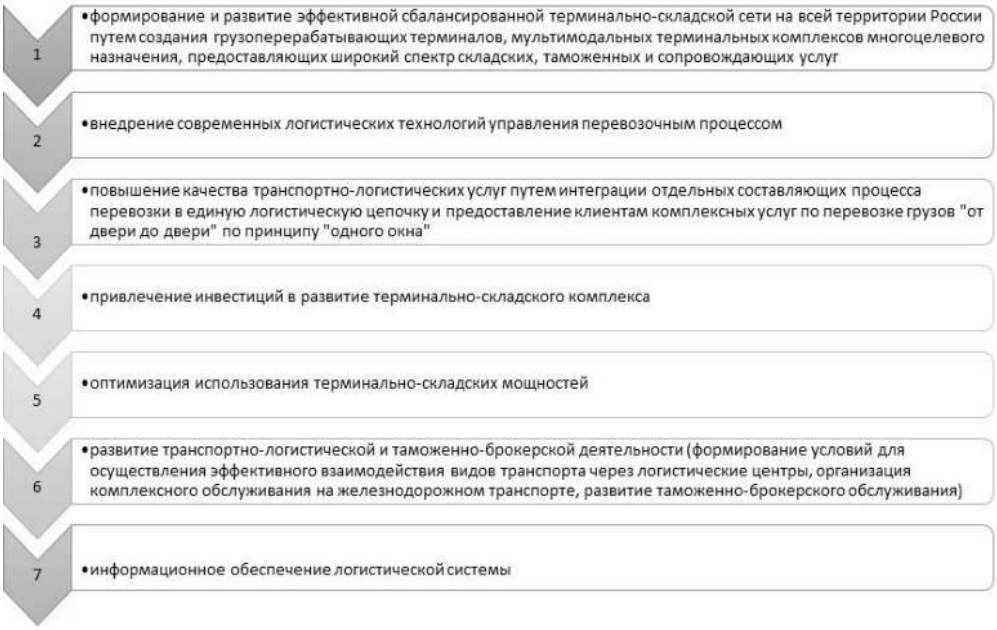


Рис. 1. Направление задач развития транспортно-складских комплексов

Объем показателей развития складской недвижимости в России за рассмотренный период показал, что объем складских площадей увеличился до 29,3 млн. кв. м, при этом 16 млн. кв. м. приходится на Московскую область, 4 млн. кв. м. на Ленинградскую область и Санкт-Петербург. Остальные регионы России составили 9,3 млн. кв. м. (рис. 2).

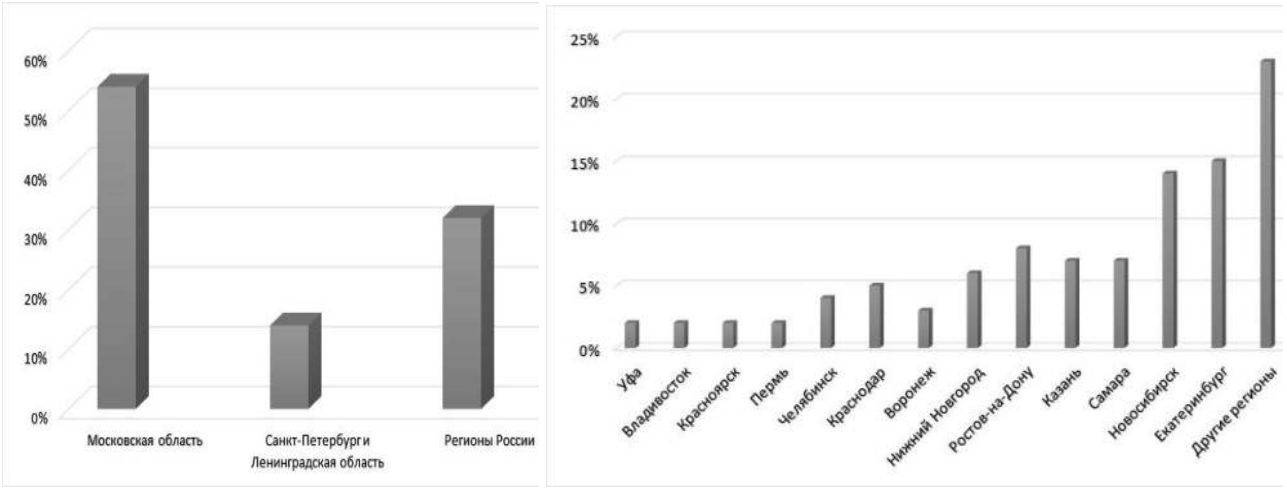


Рис. 2. Объем показателей развития складской недвижимости в России, 2020 г

Проведенный анализ развития складской недвижимости в России показал, что рынок логистических услуг будет и дальше увеличиваться. Данная тенденция подтверждается тем, что происходит увеличение региональных показателей, строятся и развиваются новые транспортно-складские комплексы. Стоит отметить, что по сравнению с 2019 годом структура новых складских площадей кардинально изменилась. Выросла доля новых складских комплексов в Санкт-Петербурге и регионах России. Региональная сеть транспортно-складских услуг имеет большие возможности для развития отрасли, роста спроса на качественные транспортно-складские услуги логистических компаний. Несмотря на это, по-прежнему остаются нерешенные проблемы и задачи с несоответствием предоставляемых услуг, их недостаточное предложение и уровень качества.

Традиционные склады имеют ряд недостатков, таких как безрезультативное управление складской площадью, повреждение груза в процессе погрузки/выгрузки, длительное выполнение работ, связанных с перемещением груза и малоэффективное погрузочно-разгрузочное оборудование (рис. 3).

Рис. 3. Проблемы традиционных транспортно-складских систем

На сегодняшний день появление сектора электронной коммерции значительно увеличились требования, касающиеся быстрого реагирования и управления большим количеством складских единиц не допуская ошибок. Основная функция современных ТСК – создание благоприятных условий для организации мультимодальных перевозок путем оказания качественных транспортно-складских услуг, основанных на мировом опыте с учетом специфики российского транспортного рынка [2].

Одним из направления решения проблем транспортно-складских систем может быть обеспечено цифровой трансформацией (цифровизацией) логистических и транспортно-складских операций. Согласно стратегии цифровой трансформации, создается цифровая транспортная инфраструктура (интеллектуальные транспортные системы, цифровые решения для грузовых терминалов), происходит цифровизация транспортных средств (тестирование беспилотных ТС, развитие мониторинга обслуживания и ремонта ТС и др.), разрабатываются цифровые транспортные сервисы [3].

Важным направлением цифровой трансформации в области грузовых перевозок выступает создание умных складов, которые позволяют автоматизировать традиционные складские функции. Понятие «Умный склад» – это склад, который предназначен для выполнения работ с максимальной эффективностью и основан на взаимодействии и интеграции систем. Задачи по завозу, вывозу грузов, расчет и оформление перевозок и доставке товаров грузополучателям на таком складе должны выполняться в автоматическом, безбумажном режиме. Киберфизические системы – системы, которые помогают создавать виртуальны копии складских процессов. Внедрение таким систем позволит преобразовать традиционный склад в «умный» транспортно-складской комплекс. Элементы «умного» склада включают в себя: роботов, людей, устройства CPS и техники.

Основными задачами «умного склада» считаются безопасное хранение грузов, распознавание человеческой активности и совместная работа с роботизированными устройства, зонирования помещения. Представлены основные системы управления «умным складом» (рис. 4). Система отслеживает местонахождение товаров, и автоматизированное управляемое транспортное средство направляется к грузу с использованием оптимизированного маршрута комплектования.

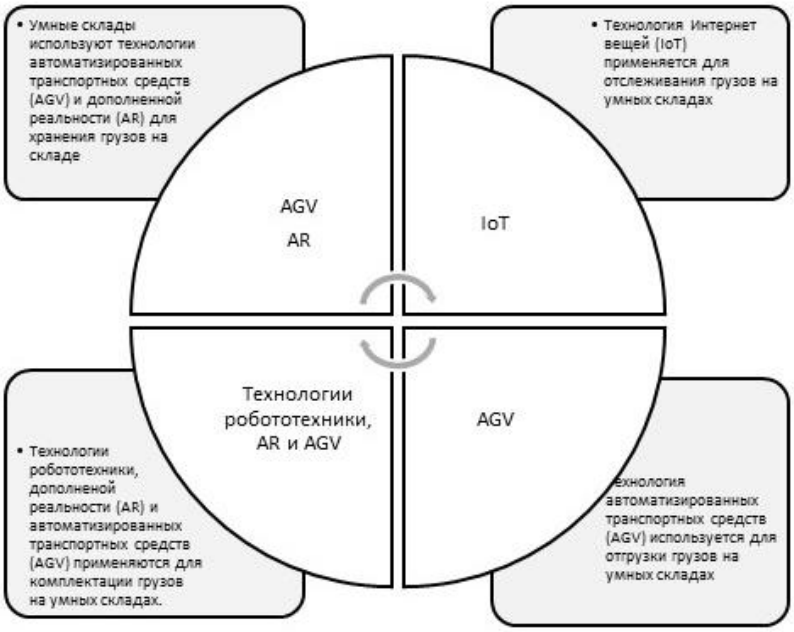


Рис. 4. Основные системы и технологии управления умным складом

Основные достоинства умных складов представлены следующим образом:

1) Получение информации прямо со склада в режиме реального времени.

2) Автоматизация ручных задач. Данное преобразование сводит к минимуму задержки при получении/отправки грузов, а также снижает ошибки, вызванные человеческим фактором.

3) Использование автоматизированных транспортных средств, позволит сократить время на операции, связанные с погрузкой/выгрузкой грузов.

4) Использование технологии дополненной реальности (AR) для хранения грузов. Данная технология может значительно ускорить процесс и снизить уровень ошибок, связанных с человеческим фактором.

5) Автоматизация решений. Система анализирует данные о количестве заказов и по средствам заданных алгоритмов способствует правильному расположению грузовых единиц на складе, чтобы следующие заказы обрабатывались быстрее.

6) Умные складские системы обеспечивают круглосуточный контроль над складом и оперативно оповещают о нештатных ситуациях.

7) Умные склады лучше адаптируются к меняющимся процессам и требованиям клиентов. Смена процессов минимально влияет на работу склада.

Проведенный анализ развития складской недвижимости в России показал, что рынок логистических услуг будет и дальше увеличиваться. Данная тенденция подтверждается тем, что происходит увеличение региональных показателей, строятся и развиваются новые транспортно-складские комплексы. Региональная сеть транспортно-складских услуг имеет большие возможности для развития отрасли, роста спроса на качественные транспортно-складские услуги логистических компаний. Проанализировав проблемы традиционных транспортно-складских комплексов, можно сделать вывод, что с появлением сектора электронной коммерции значительно увеличились требования, касающиеся быстрого реагирования и управления большим количеством данных не допуская ошибок.

Одним из направления решения проблем транспортно-складских систем может быть обеспечено цифровой трансформацией (цифровизацией) логистических и транспортно-складских операций. Важным направлением цифровой трансформации в области грузовых перевозок выступает создание умных складов, которые позволяют автоматизировать традиционные складские функции.

В настоящее время четвёртая промышленная революция влияет на производственные процессы и цифровую трансформацию организаций, применяя новые технологии, такие как периферийные вычисления, дополненная реальность, аналитика больших данных, цифровой двойник и облачные вычисления. С помощью этих технологий промышленные системы становятся умнее, но возникает ряд нерешенных задач, связанных с проблемами качества, такими как конфиденциальность, целостность и безопасность. Умные склады будут и дальше улучшаться с использованием новых, более современных технологий.

Библиографический список

1. **Коровяковская, Ю.В.** Вместимость и перерабатывающая способность складов штучных грузов на железнодорожном транспорте: специальность 05.22.08 "Управление процессами перевозок" / Ю.В. Коровяковская // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2004. – 205 с.

2. Методы формирования и принципы интеллектуализации в управлении терминально-складской системой транспортного узла / О.Н. Числов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 104-114. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_104.

3. Стратегия цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9985 (дата обращения: 30.10.2021)

УДК 621.6-52 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_58

К.Н. Войнов, д-р техн. наук (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики), **Е.С. Трофимов** (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Аннотация. *В современном мире огромное количество перевозок людей и грузов осуществляется с помощью автомобильного транспорта, едущего по разным по качеству дорогам (скоростным магистралям, городским улицам, по бездорожью и др.). Известно, что, пожалуй, одним и наиболее серьёзных аварий, приводящих к даже к невосполнимым потерям, является ситуация с проколом шины и тем более с разрушением покрышки или резинового колеса. Если скорость движения транспортного средства достаточно высокая, то не представляется возможным сохранить прямолинейность движения техники, что в противном случае может приводить к выезду машины на встречную полосу или к падению в кювет (в канаву). Таким образом, это общеизвестная транспортная проблема, которую авторы попытались успешно решить, получив не только патенты, но и проведя подтверждающие эксперименты на машинах в виде радиоуправляемых моделей.*

In the modern world a huge amount of transportation of people and goods is carried out using motor transport traveling on roads with different quality (expressways, city streets, off-road, etc.). It is known that, perhaps, one of the most serious accidents which leads to even irreparable losses is a situation with a tire puncture and even more so with the destruction of a tire or a rubber wheel. If the speed of the vehicle is high enough, it is not possible to maintain the straightness of the movement of the equipment which otherwise may lead to the departure of the car into the oncoming lane or to fall into a ditch. Thus, this is a well-known transport problem which authors tried to successfully solve by obtaining not only patents, but also by conducting confirmatory experiments on cars in the form of radio-controlled models.

Ключевые слова: модернизация колеса, конструкторско-технологическое решения, теория, эксперименты.
Keywords: wheel modernization, design and technological solutions, theory, experiments.

Введение

Первоначально укрупнённо опишем те факторы, которые часто приводят к авариям при движении на автомобилях:

- технические неисправности ответственных деталей, агрегатов и сопряжений;
- невнимательность водителей (человеческий фактор);
- практически «лысые» шины;
- чрезмерно высокие скорости движения и/или «агрессивная» езда;
- плохие погодные условия (низкая видимость, гололёд, дождь);
- некачественное дорожное покрытие и др.

В нашем случае особое внимание уделим такой поломке колеса автомобиля, которая проявляется в разрушении шины, проколам покрышки и камеры, что весьма серьёзно отрицательно влияет на возможность нормальной езды и управляемости движением автомобиля на дороге. В этих случаях появляются большие боковые силы, смещающие траекторию прямолинейного движения автомобиля в сторону, что и ведёт в конечном счёте к аварии. Асимметричное расположение кузова автомобиля со смещением его центра тяжести часто вызывают опрокидывание транспортного средства. Кроме того, наличие определённой величины коэффициента трения с одной стороны колеса (неповреждённого) и совершенно других коэффициентов трения и сил трения в зоне повреждённого колеса дополнительно негативно влияют на динамику движения транспортного средства.

Поэтому основная цель данного исследования – создать такое техническое исполнение колеса автомобиля, которое бы практически полностью нивелировало те проблемы, которые обычно возникают при типовом варианте его исполнения. При этом рассмотрение поставленной задачи выполним применительно к одному из передних колёс, так как задние колёса обычно сдвоенные, а их отказ в эксплуатации значительно реже приводит к трагическим последствиям, чем серьёзное повреждение переднего колеса.

Текст 1

Возможные пути решения проблемы обеспечения высокой надёжности движения транспортного средства при серьёзном повреждении/разрушении переднего колеса.

По интенсивным исследованиям с проведением аналитических расчётов и физическим моделированием, выполненных к.т.н. Купреяновым А.А. (Университет им. Э. Баумана, г. Москва) [1-3], на устойчивость движения колёс автомобиля влияют многие важные факторы: пятно контакта в системе «колесо – полотно дороги», давление в шине, коэффициенты трения, реакции в зоне контакта от действующих нагрузок и сил, коэффициент сцепления, угол развала колёс, траектория качения колеса и др. Однако в нашем предельном случае, когда одно из колёс по причине разрушения как покрышки, так и камеры /или целой его резиновой части/, появляется сильный поворачивающий момент для повреждённого транспортного средства в сторону дефектного колеса.

Чтобы максимально обезопасить автомобиль от опрокидывания и по возможности сохранить его прямолинейное движение, была проведена серия модернизаций переднего колеса на физической модели, например, изготавливая его составным с замковым соединением его частей. Кроме того, диск из прочного и износостойкого материала располагается между двух резиновых частей (надувных или цельнолитых резиновых), на которые надевается покрышка со стандартным протектором, имеющим стандартный рисунок. Диаметр вставного страховочного диска имеет размер, который максимально близко подходит к внутреннему диаметру надетой на колесо покрышки. Таким образом, при разрушении покрышки или двух резиновых частей колеса общий диаметр колеса из-за страховочного

вставленного диска почти не изменяется, что и страхует автомобиль от опрокидывания при аварийных ситуациях [1-6].

С позиций триботехники наружная поверхность страховочного диска выбирается из такого прочного материала, который имеет коэффициент трения при качении по полотну дороги близком к тем значениям, которые равны примерно от 05 до 0,8, чтобы обеспечить максимально большое трение и высокий коэффициент сцепления с дорогой как при сухом дорожном покрытии, так и в мокрую погоду. Это дополнительно будет препятствовать быстрому сползанию машины в кювет или выезду на встречную полосу движения.

Текст 2

Особенности конструктивного исполнения колеса автомобиля (Рис. 1).

Рис. 1. Радиоуправляемая модель с новым передним колесом (слева) и один из вариантов усовершенствованного колеса (справа)

В одном из экспериментов в качестве протектора была использована медная проволока (в виде косички). Встраиваемые под общую покрышку с протектором страховочные диски-колёса были сделаны составными из двух половинок для удобства ручного монтажа. Толщина каждой из косичек составляла 1,5 мм, чтобы отклонение от размера исправного колеса составляло бы не более 0,2 мм. Косичка была установлена на клей «Момент». Встроенные в новое колесо страховочные диски-колёса были выполнены из твёрдого материала (не из резины). Сверху модернизированное колесо закрывалось материалом из типовой резиновой покрышки с протектором (рис. 2).

Для иного случая, в частности, для колёс транспортного средства большой грузоподъёмности конструктивная модернизация была принята следующая: 1 – диск колёсный; 2 – покрышка с протектором; 3 – два симметрично расположенные сбоку по отношению к позиции 4 страховочных диска; 4 – страховочное литое резиновое кольцо, армированное внутри металлом.

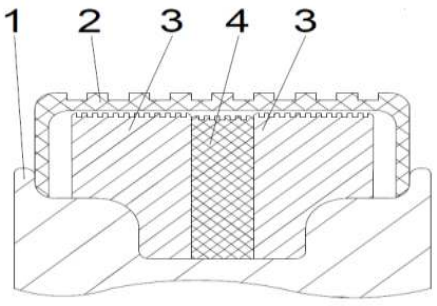


Рис. 2. Разрез разработанного колеса: *1* – диск колёсный; *2* – покрышка с протектором; *3* – диски страховочные со своим протектором; *4* – кольцо резиновое или резинометаллическое.

При эксплуатации среднее страховочное кольцо и два страховочных диска воспринимают действующую на них нагрузку как от веса транспортного средства, так и от неровностей дорожного покрытия. Наличие встроенных дисков и страховочного кольца резервирует общую надёжность колеса в случае его прокола или при его частичном разрушении от времени (из-за старения либо из-за пропущенного при изготовлении технологического брака). При этом в случае полного разрушения покрышки движение тяжёлого транспортного средства до его полной остановки возможно на прочных страховочных дисках и страховочном кольце, наружные поверхности которых имеют протектор, препятствующий беспрепятственному скольжению колеса, устраняющему появление аварийной ситуации. Кроме того, на меньшей скорости появляется реальная возможность для продолжения движения транспортного средства в случае необходимости.

Текст 3

Теоретические предпосылки и комментарий.

Процесс исследования включал следующие этапы с определением траектории движения автомобиля с повреждённым колесом и с фиксацией при этом скорости и грузоподъёмности модели машинки: - движение модели без утяжеления грузом по сухому полу; - движение модели без утяжеления по мокрому полу; - движения модели с разными вариантами утяжелений от перевозимого груза; - математико-компьютерное описание траекторий движения модели с использованием компьютерной оболочки MathCad.

Приводимые ниже формулы использовались по своему назначению, например.

При расчёте деформации (сжатия) диска колеса (F – значение абсолютной величины силы) из-за возможного разрушения покрышки и резиновых частей:

$$F = k(l - l_o) = k\Delta l, \quad (1)$$

где l – длина деформированного тела;

l_0 – первоначальный размер тела;

k – коэффициент пропорциональности, являющийся по своей сути коэффициентом упругости (численно равный абсолютной величине силы, вызывающей деформацию, равную единице длины);

Δl – деформационная составляющая.

Сила упругости противоположна по своему направлению вектору удлинения. Поэтому:

$$F_{упр} = -k\Delta l. \quad (2)$$

Сила равна произведению массы тела на ускорение, которое она сообщает телу (по второму закону Ньютона как основному закону динамики):

$$F = ma. \quad (3)$$

Импульс (или количество движения) есть вектор, равный произведению массы тела (в нашем случае – автомобиля) на его скорость:

$$p = mv. \quad (4)$$

Силу трения скольжения для колеса можно вычислить по формуле:

$$T_{ск} = \mu N, \quad (5)$$

где μ - коэффициент трения скольжения; N – сила нормального давления.

Сила трения качения радиусом r без проскальзывания:

$$T_{кач} = \frac{kN}{r}. \quad (6)$$

Момент силы относительно оси вращения (при заклинивании дефектного колеса – точки для вращения автомобиля):

$$M = Frsin\gamma = Fd, \quad (7)$$

где d – плечо силы (произведение радиуса на синус угла между направлением силы и направлением радиуса, проведённого от оси вращения до точки приложения силы).

Эксперимент с радиоуправляемой моделью грузовика проводился как на сухой, так и на мокрой поверхности. Программой MathCAD были описаны графики для чётного и

нечётного числа точек наблюдения [7, 8]. Во всех вариантах ось абсцисс – путь движения модели (мм), ось ординат – отклонение траектории движения от прямой (мм).

Данные экспериментов всегда записывались в виде таблицы,

где n – номер контрольной точки, в которой проводилось измерение;

S – пройденное автомобилем расстояние, мм;

Δ – отклонение от прямой траектории, мм.

Если значение отклонения отрицательное, то автомобиль уклоняется влево, если положительное – автомобиль уводит вправо, при Δ=0 автомобиль следует по прямой траектории;

m – масса добавленного груза в автомобиль, кг;

V – скорость автомобиля, м/с.

Заключение и выводы

1) Усовершенствованный вариант колеса [9-10], содержащего внутри два прочных страховочных диска с рифлением поверхности качения по типу протектора шины, имеет повышенную надёжность и не позволяет транспортному средству (легковому/грузовому автомобилю или самолёту) «завалиться» на бок, то есть привести к серьёзной аварии. Если вероятность безотказной работы каждого страховочного диска равна p=0,95, то при их взаимном резервировании общая надёжность P системы/колеса определится по формуле $P = 1 - (1 - p)^2 = 0{,}9975$, то есть близка к единице! Если прочность и надёжность каждого страховочного диска будет по вероятности безотказной работы равна 0,99, что обычно соответствует высоко надёжным системам, то общая вероятность безотказной работы в этом случае будет $P^* = 0{,}9999$ (практически 1)!!! И это даже без учёта страховочного кольца!

2) Выполненные экспериментальные научные исследования были проведены на радиоуправляемой модели автомобиля, у которого одно переднее колесо было поставлено в усовершенствованном запатентованном виде.

3) В соответствии с разработанной методикой научных испытаний учитывались следующие характеристики движения модели транспортного средства (автомобиля): скорость движения, масса и расположение груза, перевозимого машиной, траектория движения машины, качение модели как по сухой поверхности, так и по мокрой.

4) Зафиксированные траектории движения модели математически обрабатывались на компьютере в оболочке MathCAD при чётном и нечётном числе статистических данных с получением уравнений и соответствующих графиков. Все выполненные нелинейные аппроксимации данных полиномом второй степени – везде хорошие (точные).

5) Итоговые результаты исследований на длине пути в 3,5 метра – следующие:

- максимальные отклонения траектории движения модели на сухом и мокром покрытии составляли 73…79 мм; при этом модель была без водителя, который обязательно с помощью поворота руля выровнял бы траекторию движения машины;

- скорость движения модели была постоянная 0,86 м/с;

- отклонение от прямолинейного движения модели при увеличении грузоподъёмности машины с 0,5 кг до 1,0 кг как на сухом покрытии, так и на мокром произошло примерно в 2 раза больше; отклонение от прямолинейной траектории движения модели для порожнего автомобиля и загруженного на 0,5 кг произошло на сухом и на мокром покрытии примерно в 1,3…1,6 раз больше;

- ни в одном из изученных вариантов с модернизированным колесом автомобиль не опрокинулся; при этом чем меньше разность диаметров между страховочными дисками по отношению к диаметру неповреждённого колеса, тем меньше имеет место отклонение траектории движения автомобиля от прямой линии (минимально до 8 мм).

6) Проведённые исследования подтвердили, что новый предложенный вариант изготовления колеса транспортного средства (как для автомобиля, так и для самолёта) может быть реализован на практике, что позволит избежать тяжёлых аварий и катастроф в реальной эксплуатации.

Библиографический список

1. **Яворский, Б.М.** Основы физики / Б.М. Яворский, А.А. Пинский Том 1. М.: Наука, 1974. – 496 с.

2. Сопротивление материалов: Основы теории, примеры, задачи / Елизаров С.В. [и др.] // СПб., ПГУПС, 2006. – 400 с.

3. **Аркуша, А.И.** Техническая механика: Теоретическая механика и сопротивление материалов / А.И. Аркуша // М.: Высшая школа. 1989. – 352 с.

4. Физика / Е.И. Бутиков [и др.] // М.: Наука, 1978. – 608 с.

5. **Яворский, Б.М.** Справочное руководство по физике / Б.М. Яворский, Ю.А. Селезнёв // М.: Наука. 1989. – 576 с.

6. **Елизаров, С.В.** Сопротивление материалов. / С.В. Елизаров, Ю.П. Каптелин // СПб., ПГУПС, 2007. – 254 с.

7. Трибология: Международная энциклопедия. Том X: Моделирование и расчёты в трибологии и надёжности. Университет ИТМО, СПб. // Под ред. проф. К.Н. Войнова. 2015. – 200 с.

8. **Плис, А.И.** MATHCAD 2000: математический практикум / А.И. Плис, Н.А. Сливина // М.: Финансы и статистика. 2000. – 544 с.

9. **Патент № 2728200 Российская Федерация.** «Колесо безопасное для транспортных средств», 2020. Трофимов Е. С.

10. **Патент № 2740952 Российская Федерация.** «Колесо безопасное для транспортных средств с повышенной нагрузкой», 2020. Войнов К. Н., Трофимов Е. С.

УДК 656.22 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_63

В.М. Задорожний, канд. техн. наук, **М.В. Бакалов,** канд. техн. наук, (Ростовский государственный университет путей сообщения, Научно-технологический университет «Сириус»), **С.В. Шляпников** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗО- И ВАГОНОПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ МУЛЬТИАГЕНТНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. *Современные условия организации и реализации перевозки грузов железнодорожным транспортом предполагают взаимодействия нескольких участвующих сторон (перевозчик, собственник подвижного состава, грузовладелец, оператор), действующих в условиях конкуренции. Исследование и моделирование параметров распределения грузо- и вагонопотоков в условиях мультиагентности транспортного комплекса, при котором применяется разработанный авторами экономико-географический метод разграничения «областей влияния» станций позволяет создавать аналитические модели процесса перевозок на основе комплексной оценки транспортно-технологической инфраструктуры железнодорожного полигона.*

Modern conditions for the organization and implementation of the carriage of goods by rail involve the interaction of several parties involved (carrier, owner of rolling stock, cargo owner, operator) operating in a competitive environment. Investigation and modeling of the distribution parameters of freight and wagon traffic in the multi-agent transport complex, in which the authors apply the economic and geographical method of delimiting the « influence areas » of stations, it is possible to create analytical models of the transportation process

based on a comprehensive assessment of the transport and technological infrastructure of the railway polygon.

Ключевые слова: моделирование, граф, транспортный полигон, экономико-географический метод, «области влияния» станций, распределение вагонопотоков, мультиагент.
Keywords: modeling, graph, transport polygon, economic-geographical method, « influence areas» of stations, distribution of car traffic, multi-agent.

Современные условия организации и реализации перевозки грузов железнодорожным транспортом предполагают взаимодействие нескольких участвующих сторон (перевозчик, собственник подвижного состава, грузовладелец, оператор и др.), действующих в условиях конкуренции. При осуществлении экспортно-импортных перевозок часто используют мультимодальные схемы транспортировки, в которых принимают участие также субъекты автомобильного и водного транспорта, в частности морские порты. Следует иметь ввиду возрастание объёмов перевозок в направлении портов, что во многом обусловлено сырьевым характером российской экономики, а также высоким потенциалом международных транспортных коридоров, осуществляющих транзит грузопотоков.

В условиях экономической неустойчивости, частой неравномерности грузопотоков в адрес припортовых систем и связанных с ними процессов транспортировки, традиционные технологии прогнозирования и управления часто не дают ощутимого результата. Это особенно проявляется в транспортных узлах, обеспечивающих мультимодальные перевозки в составе которых используется железнодорожный, автомобильный и водный транспорт.

В условиях расширения внешнеэкономических торговых связей необходимы исследования аспектов развития методов моделирования параметров распределения грузо- и вагонопотоков в условиях мультиагентности транспортного комплекса с учетом реализации транзитного потенциала страны, интеграции и связанности с международными транспортно-логистическими коридорами.

Условия пандемии вывели на первый план значимость мультимодальных перевозок, прежде всего железнодорожно-морское сообщение, как ключевого сектора для осуществления бесперебойных поставок жизненно важных товаров и глобальной торговли в кризисный период, на этапе восстановления и после возвращения к нормальной жизни.

Припортовая транспортно-технологическая система (ТТС), являясь важнейшим элементом мировых грузовых перевозок, находится в условиях, связанных не только с пандемией и нестабильностью мировой ситуации, но и с долговременными факторами в диапазоне изменения структуры логистических цепочек и моделей глобализации до изменений стереотипов потребления и расходования средств, растущего внимания к вопросам оценки рисков и повышения стойкости к потрясениям.

Основой для дальнейшего развития теорий и методов управления грузопотоками припортовых транспортных систем являются исследования в рамках мультимодальных систем транспортировки [1–5].

Рассматриваемую в настоящей статье математическую модель процесса региональных перевозок можно развивать в разных направлениях. Во-первых, это – расширение набора параметров и показателей перевозочного процесса, характеризующих экономическую эффективность и качество организации этого процесса. Во-вторых, можно обращаться к другим формам оптимизационных критериев, посредством которых алгоритмизируется выделение более рациональных планов перевозок.

Идея состоит в том, что в качестве одного из источников, позволяющих формулировать ограничения на множество D возможных планов перевозок $\left(x_{ij}\right)$, мы рассмотрим разработанную ранее геометрическую евклидову модель (ГЕМ) транспортного полигона [4] (рис. 1). Условием, обеспечивающим корректность построения такой модели, является наличие плотной сети железных дорог в рассматриваемом регионе.

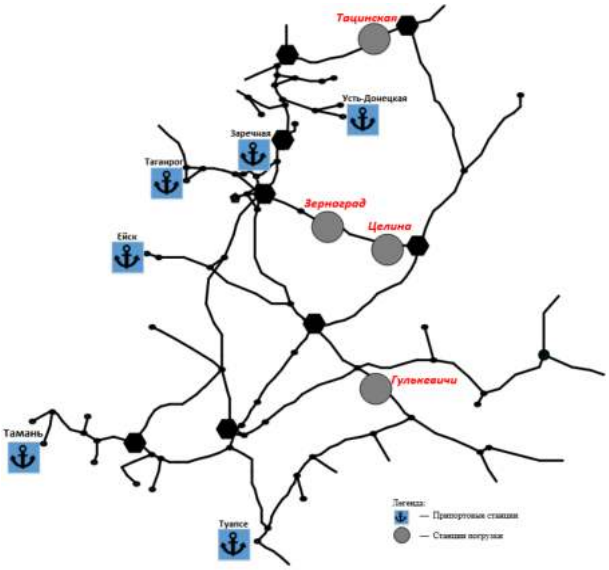


Рис. 1. Искомый граф транспортного полигона

«Области влияния» станций погрузки, получаемые методом экономико-географического разграничения, позволяют сформулировать ряд предпочтительных направлений при распределении вагонопотоков. Напомним, что в качестве показателя, в соответствии с которым в ГЕМ определяются указанные области, выступает тариф на перевозку.

В ходе обработки статистических данных тарифов перевозок строится зависимость (рис. 2) и находятся выражения зависимости (табл. 1).

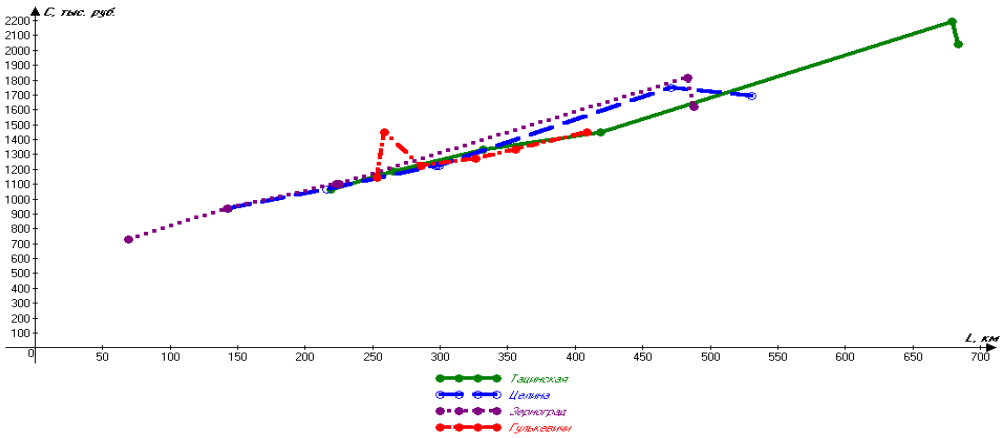


Рис. 2. Зависимость тарифа на перевозку

Таблица 1

Выражения зависимости стоимости перевозки

№	Станции погрузки	$c = p + ql$
1	Тацинская	$c = 589{,}24 + 2{,}17l$
2	Целина	$c = 621{,}3 + 2{,}13l$
3	Зерноград	$c = 593{,}45 + 2{,}26l$
5	Гулькевичи	$c = 1085{,}16 + 0{,}6l$

Обратим внимание на то, что различие между станциями погрузки выражается как в стоимости начально-конечных операций, так и в стоимости движенческих операций. Следовательно, территориальная картина полигона перевозок описывается алгебраическими кривыми 4-го порядка, а именно, овалами Декарта.

Отметим, что в данном разделе статьи понятия дуополия и олигополия применяются по отношению к станциям погрузки, которые в экономическом плане можно позиционировать как олигополистов. Конкуренция между этими станциями может выражаться, например, в стремлении наиболее эффективного использования вагонного парка какой-либо операторской компании.

«Области влияния» станций погрузки Зерноград и Гулькевичи в дуополистической ситуации приведены на рис. 3. В «область влияния» станции Гулькевичи попадают припортовые станции: Тамань и Туапсе, а в «область влияния» станции Зерноград – припортовые станции: Ейск и Азов, Таганрог, Усть-Донецкая. Отметим, что станция погрузки Гулькевичи попадает в «область влияния» станции погрузки Зерноград. Объяснением служит то обстоятельство, что затраты на начально-конечные операции на станции Гулькевичи почти вдвое превышают аналогичные затраты на станции Зерноград (см. табл. 1). Однако, поскольку затраты на движенческие операции у станции Гулькевичи значительно меньше, чем у всех остальных станций погрузки, эта погрузочная станция оказывается более конкурентоспособной в отношении пунктов назначения, которые могли бы находиться на достаточно больших расстояниях от всех станций погрузки.

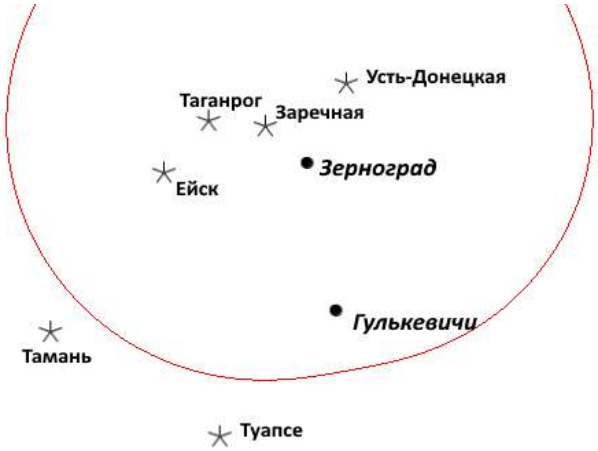


Рис. 3. «Области влияния» станций Зерноград и Гулькевичи в случае дуополии

Полученная с помощью системы аналитических вычислений территориальная картина, создаваемого четырьмя станциями погрузки, приведена на рис. 4.

Рис. 4. Территориальная картина полигона перевозок в ГЕМ

Исследование и моделирование параметров распределения грузо- и вагонопотоков в условиях мультиагентности транспортного комплекса, при котором применяется разработанный авторами экономико-географический метод разграничения «областей

влияния» станций позволяет создавать аналитические модели процесса перевозок на основе комплексной оценки транспортно-технологической инфраструктуры железнодорожного полигона и стоимости транспортных услуг.

Одним из перспективных направлений развития рассматриваемого метода являются подходы, основанные на использовании нечетких моделей, а также моделирование учета экологических критериев и вариативности влияния различных решений распределения вагонопотоков на величину углеродного следа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51014.

The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-38-51014.

Библиографический список

1. Логистика и организация перевозок припортовой железной дороги на современном этапе / Э.А. Мамаев [и др.] // Вестник РГУПС. – 2019. – №4. – С. 155-163.

2. **Черняев, А.Г.** На основе развития инфраструктуры и полигонных технологий / А.Г. Черняев, В.Н. Зубков, М.В. Бакалов // Железнодорожный транспорт. − 2016. − № 9. – С.32-37.

3. Развитие инфраструктуры и внедрение новых технологических решений на Северо-Кавказской железной дороге в условиях роста объемов перевозок грузов / Д.Г. Кучинский [и др.] // Вестник РГУПС. – 2018. – №2. – С. 109-117.

4. Multi-agent simulation of the balanced main parameters of the logistics centers / A. Rakhmangulov [et al.]// IFAC-PapersOnLine. – 2019. – Volume 52 (13). – P. 1057-1062.

5. Экономико-географическая модель управления контейнерными перевозками в железнодорожной припортовой транспортно-технологической системе / О.Н. Числов [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (36). – С. 12-22.

УДК 626.01:624.1 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_67

Т.П. Кашарина, д-р техн. наук., **Д.Д. Кашарин** (ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова)

НОВЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. *В данной статье рассмотрены вопросы существующих транспортных систем. Предложены новые технические решения по обеспечению надежности и безопасности их в современных природно-техногенных условиях. Предложены решения проблем влияния подтоплений, затоплений, мерзлых грунтов, оползней, динамических (сейсмических) воздействий на транспортные системы. Рассмотрены возможности применения новых многофункциональных гетерогенных наноматериалов.*

This article discusses the issues of existing transport systems. New technical solutions are proposed to ensure their reliability and safety in modern natural and man-made conditions. Solutions to the problems of the influence of flooding, flooding, frozen soils, landslides, dynamic (seismic) effects on transport systems are proposed. The possibilities of using new multifunctional heterogeneous nanomaterials are considered.

Ключевые слова: Транспортные системы, автодороги, воздушные пути, композитные материалы, новые технические решения, природно-техногенные воздействия, затопления, мерзлые грунты, сейсмические воздействия, динамические воздействия, подтопления, оползни, расчетные обоснования.
Keywords: Transport systems, roads, airways, composite materials, new technical solutions, natural and man-made impacts, flooding, frozen soils, seismic impacts, dynamic impacts, flooding, landslides, calculation justifications.

Устойчивое развитие страны, повышение уровня и качества среды жизни населения, связанность территории России за счет создания интеллектуальных транспортных систем является одной из важнейших задач современности [1-2].

На рис. 1 представлены транспортные системы России. Они подразделяются на транспорт: общего пользования (железнодорожный, воздушный, автомобильный и др.); необщего пользования для отраслей материального производства. Значительная часть транспортных систем страны не соответствует современным стандартам и требует улучшения.

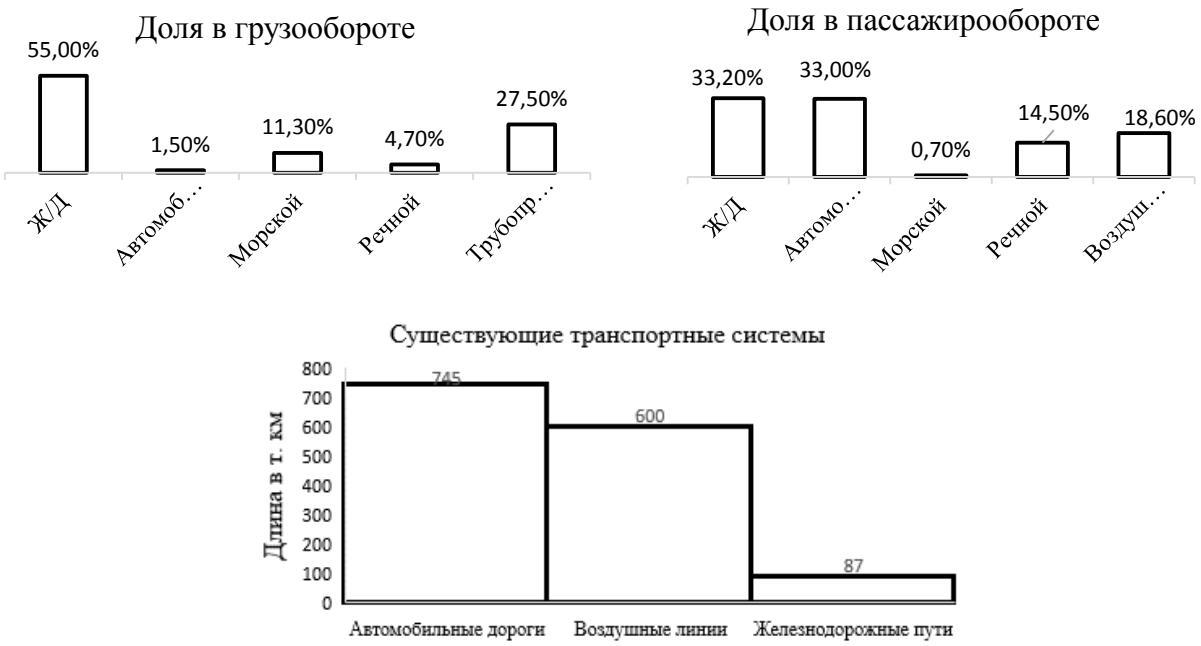


Рис. 1. Текущее распределение типов транспортных систем: *а)* доли различных транспортных систем в грузовых и пассажирских перевозках; *б)* данные по протяженности автомобильных, воздушных и Ж/Д путей

Нами предлагаются новые защитные транспортные системы для автомобильного и воздушного транспорта, которые создаются из многофункциональных многослойных гетерогенных оболочек из композитных наноматериалов, имеющих прослойки из естественных или искусственных волокон с трибологическим веществом-смазкой с заданными свойствами (рис. 2). Коэффициент толщины жидкой смазочной пленки принимается в пределах $1<\lambda<3$ [4, 5].

Защитная транспортная система дорожных конструкций с учетом патента включает в себя: дорожное покрытие; основание; дренирующий слой в виде грунтонаполняемых оболочек, заполненных сорбентом из гранулированных элементов различных форм и размеров. Откосы транспортной системы покрыты композитным материалом с семенами, обладающими гетеромодульными свойствами, памятью формы. По периметру они снабжены демпфирующими структурами (складками), которые обеспечивают надежность и безопасность при значительных поверхностно-сейсмических воздействиях, т. е. препятствуют

разрывам, а также оттаиванию, осадкам и подтоплениям грунтов оснований, что особенно важно с учетом современных природно-техногенных воздействий. [4]

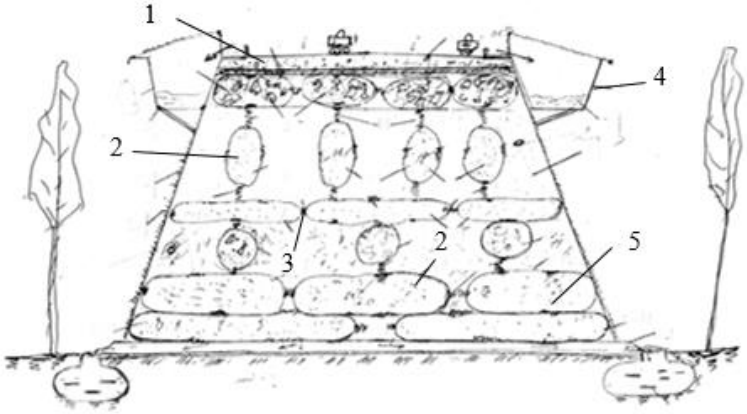


Рис. 2. Защитная транспортная система дорожных конструкций
1 – дорожное покрытие; *2* – грунтонаполняемые оболочки; *3* – демпфирующие устройства; *4* – ливнеотводящий лоток; емкость для хранения воды

Устойчивое положение дренажных и ливнеотводящих систем обеспечивается системами с емкостями для хранения и очистки загрязненных вод, что обеспечивает их дальнейшее использование в технических целях.

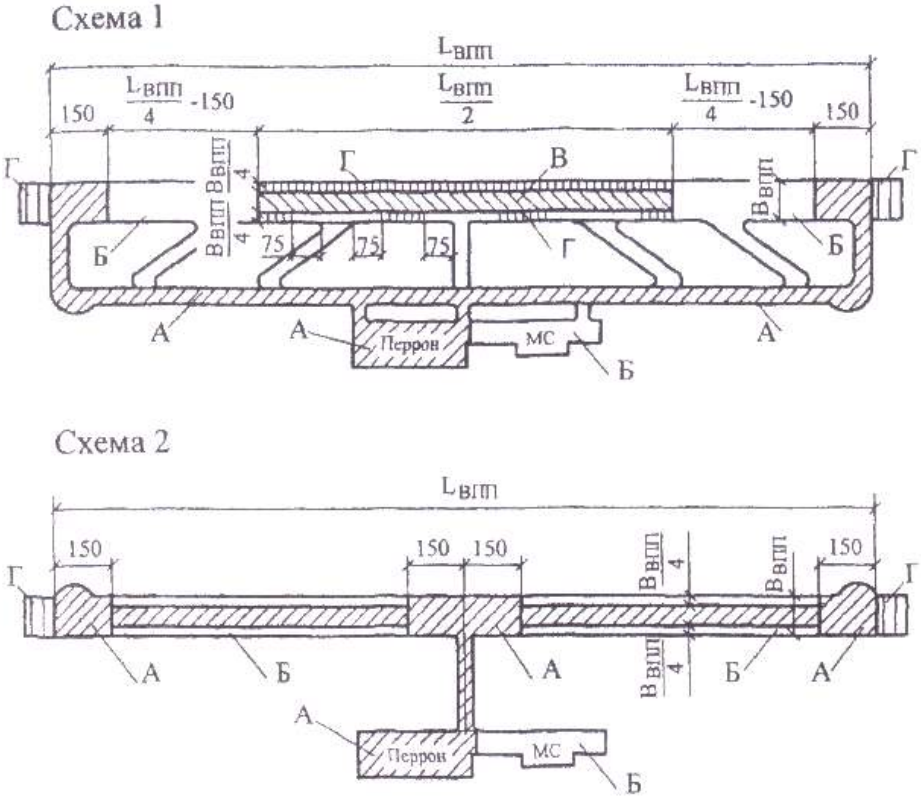


Рис. 3. Представлены варианты схем для аэропортов и инженерной ВПП, на которых руление воздушных судов осуществляется по магистральной РД; Схема 2 - для аэродромов, на которых руление осуществляется по ИВПП; *А* - магистральные РД; концевые участки ИВПП; средняя по ширине часть ИВПП, по которой осуществляется систематическое руление воздушных судов; перрон; *Б* - участки ИВПП, запроектированной по схеме *1*, примыкающие к концевым ее участкам; краевые по ширине участки в средней части ИВПП, запроектированной по схеме *2*; вспомогательные и соединительные РД, МС и другие аналогичные площадки для стоянки воздушных судов; В - средняя часть ИВПП

Данная система контролируется постоянным мониторингом с современными измерительными комплексами, что обеспечивает незамедлительный контроль последствий воздействий на сооружение.

На основании проведенного анализа катастроф из-за недостаточной длины взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэродрома необходимо создание нового технического решения по разработке дополнительного участка его, обеспечивающего надежность и безопасность воздушных судов, пассажиров и самого аэропорта.

Предлагается устраивать дополнительный участок в виде пандуса с уклоном ≥0,003, длиной $L_д \geq 150$ м.

Далее представлен вариант технического решения с учетом применения современных композитных материалов.

На рис. 4 представлен дополнительный участок ВПП, который состоит дополнительного участка 1, покрытия 2, ограждающего устройства 3, состоящего из двух оболочечных элементов, соединенных между собой гибкой связью, а дополнительным упором служит вертикальный шпунт, опирающийся в плоской части на грунтонаполняемую оболочку, укладываемую на плиту, расположенную в конце шпунта, что обеспечивает дополнительную устойчивость воздушного судна. В основании дополнительного участка и по всей ВПП нами рекомендуется под асфальтобетонное основание нежесткой конструкции укладывать геотехнический материал, а также и перед следующим слоем, что повышает устойчивость и гибкость его, также предусматривается создание защитного дренажа и ливнеотводящих устройств, которые подают поступающие дренажные и вадозные воды в специальный очистной комплекс, обеспечивающий понижение уровня грунтовых вод.

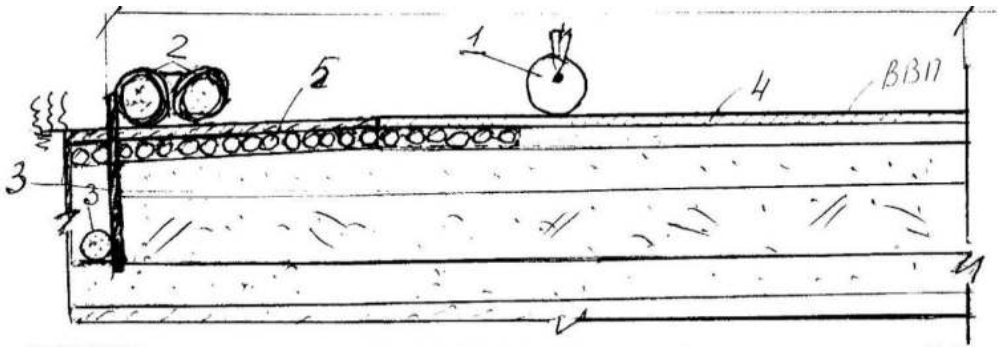


Рис. 4 – Дополнительный участок взлетно-посадочной полосы аэропорта «Новый» города Хабаровска: $L_д \geq 150$ м., $L = 230$ м

Устройство под асфальтобетонным покрытием грунтонаполняемых оболочек из геокомпозитного материала, что дополнительно обеспечивает надежность и безопасность ВПП на протяжении всего срока службы нежесткого основания, в т. ч. дополнительного участка-пандуса. За ограждающими конструкциями грунтонаполняемых оболочек, диаметр которых не превышает d колеса $\leq d_к$, осуществляет посев трав и кустарников, обеспечивая дополнительную экологическую безопасность, согласно экологической инфраструктуре аэропортов России.

Для определения необходимых параметров оболочечных конструкций (в т.ч. их формы) с учетом качества композитных материалов по предложению автора следует использовать следующую зависимость:

$$\Phi_{(\alpha)} = f(N_1, N_2, N_p, T, A, t, \lambda_c, \lambda, T_S, X_c, K_б), \quad (1)$$

где N_1, N_2 – внутренние и внешние воздействия;

A, X_c – свойства композитного материала;

N_p – волновые сейсмические воздействия;

λ_c – коэффициент толщины слоя смазки;

T_S – механическая поверхность трения;

T – усилия в оболочке;

λ – восстановительная энергия;

t – жизненный цикл объекта;

$K_б$ – коэффициент вероятности разрушения объекта в зависимости от срока службы и прогноза долголетия:

$$K_б = K \cdot e^{\xi x + c\Psi^2} \tag{2}$$

где K, ξ, Ψ – постоянные обработки статистических данных мониторинга количественного и качественного анализа состояния композитного материала [3-8].

Технологическая схема устройства грунтонаполняемого слоя покрытия дополнительного участка ВПП представлена на рисунке 5.

Рис. 5. Технологическая схема устройства грунтонаполняемого слоя покрытия дополнительного участка взлетно-посадочной полосы аэропорта «Новый»

На основании вышеизложенного разрабатываются имитационные модели для управления данными системами.

Библиографический список

1. Указ Президента Российской Федерации №642 от 1 декабря 2016 года «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»
2. Постановление Правительства Российской Федерации №1530 от 23 сентября 2020 года «Об утверждении правил представления субсидии из федерального бюджета управляющей компании, осуществляющей функции по управлению территориями опережающего социально-экономического развития и государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации.
3. СП 121.13330.2012 Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96.
4. **Щербин, Е. В.** Геосинтетические материалы в строительстве / Е.В. Щербин // учеб. пособие. – М.: изд-во АСВ, 2004.
5. Грунтонаполняемая оболочка: свид. ПрЭВМ 201061995/ Т.П. Кашарина [и др.] №2009616940
6. Основные положения по расчету грунтонаполняемых оболочек / Т. П. Кашарина [и др.] // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во иархит. 2011. Вып. 25(44). С. 72—77.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610995 «Грунтонаполняемая оболочка». Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2010
8. **Гольденвейзер, А.Л.** Теория упругих тонких оболочек: монография / А.Л. Гольденвейзер // – М.: Наука, 1976. – 512 с.

УДК 629.471 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_72

И.К. Лакин, д-р техн. наук (*АО «Трансмашхолдинг»*)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ НАДЁЖНОСТИ В УСЛОВИЯХ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. *В статье рассмотрен опыт автора применения основных понятий национального стандарта в области управления надёжностью изделий применительно к отечественным локомотивам. Показано, что нуждаются в уточнении понятия «Предотказное состояние», «Бортовые средства диагностирования» и ряд других. Уточнения необходимы для правильного построения автоматизированных систем технического диагностирования и современных технологических процессов технического обслуживания и ремонта локомотивов.*

The article considers the author's experience in applying the basic national standard concepts in the field of product reliability management in relation to domestic locomotives. It is shown that the concepts of "Pre-fail condition", "On-board diagnostic tools" and others need to be clarified. Clarifications are necessary for the correct construction of automated systems of technical diagnostics and modern locomotives maintenance and repair technological processes.

Ключевые слова: локомотивы, сервисное техническое обслуживание и ремонт, диагностика, надёжность, качество, автоматизация управления, терминология.
Keywords: locomotives, service maintenance and repair, diagnostics, reliability, quality, management automatization, terminology.

Важным показателем качества эксплуатации сложных технических систем является их техническое состояние, диагностирование которого было заложено в середине 20 века в трудах А. В. Мозгалевского, П. П. Пархоменко, В. В. Карибского, Е. Г. Согомоняна [1, 2]. Применительно к локомотивам задачи диагностирования и управления надёжностью заложены в трудах И. П. Исаева, В. Т. Стрельникова, А. В. Горского, А. А. Воробьёва, В. А. Четвергова и многих других [3, 4, 5]. В настоящее время методы надёжности развиваются в трудах молодых учёных [5 – 11]. Можно утверждать, что в рамках теории локомотивной тяги сформировалось самостоятельное направление управления надёжностью, качеством эксплуатации, техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов. Проводятся научно-практические конференции, полностью посвящённые этой тематике [12].

Базовые понятия надёжности и технического диагностирования доведены до уровня национальных стандартов, основными из которых является серия ГОСТ 27 «Надёжность в технике» и ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения» [13, 14]. Точное использование принятых терминов играет важную методическую роль, определяя правильность подходов к организации процессов. В связи с этим в статье предпринята попытка критически осмыслить принятую терминологию.

Первыми рассмотрены термины «Техническая диагностика» и «Техническое диагностирование». В ГОСТ 20911-89 [14] техническая диагностика определена как область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов, а техническое диагностирование как определение технического состояния объекта. При том что в медицине термин «Диагностика» относится именно к процессу диагностирования, причём со времён древнего мира: «Bene dignoscitur bene curatur», что применительно к технике можно перевести как «Что хорошо диагностируется, то хорошо обслуживается». Слово «диагностика» короткое и удобное, слово «диагностирование» длинное и трудновыговариваемое. В результате в литературе огромная путаница в использовании этих терминов. Предлагается узаконить применение термина «Техническая диагностика» (диагностика) в значении «Техническое диагностирование» (диагностирование). В данном случае проще изменить стандарт, чем всех переучить, тем более, повторюсь, в медицине (родоначальнице диагностики) это уже есть.

В рассматриваемом стандарте есть понятие «Контроль технического состояния»: «Проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени». Предлагается написать проще, что этот термин есть синоним термина «Техническое диагностирование» (диагностика). Тем более, что в стандарте термины «Технический диагноз» и «Результат контроля» рассматриваются как синонимы: «Результат диагностирования».

Представляется не правильным термин «Экспресс-диагностирование» - диагностирование по ограниченному числу параметров за заранее установленное время. Во-первых, любое диагностирование происходит за ограниченное время. Поэтому и диагностирование исправного состояния на практике невозможно: никакое диагностирование не позволит с единичной вероятностью утверждать, что сложный объект исправен. Исправность объекта диагностирования – это как ноуменальный мир («вещь в себе») в теории познания Иммануила Канта: нам в наших ощущения даже при использовании инструментов доступен только феноменальный мир («вещь для нас»). Во-вторых, диагностирование согласно [1] предполагает для определения работоспособности обязательное использование всех входных X и всех выходных Y сигналов, а для определения исправности – ещё и внутренних сигналов Z. Таким образом, правильней говорить об экспресс-диагностировании отдельных свойств.

Представляется недостаточным раздел стандарта и по видам средств диагностирования, который делит, в частности, их на внешние и встроенные. Современные локомотивы имеют бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ), управляющие в автоматическом или автоматизированном режимах тягой поездов. МСУ получают информацию от датчиков (устройств, преобразующих контролируемый параметр в

электрический сигнал), установленных в цепях управления и внутри оборудования, и преобразуют её в цифровой вид с помощью аналогово-цифровых преобразователей (АЦП). Датчик контролируют скорость локомотива, скорость вращения оборудования (колёсные пары, дизель, турбины и др.), виброускорения, токи и напряжения, температуру и давление и др. Также на вход МСУ поступает управляющая информация с пульта и контроллера машиниста в виде цифровых сигналов. Поступившая информация анализируется и согласно заложенным в программном обеспечении МСУ алгоритмам осуществляется выработка управляющих решений с последующим воздействием на оборудование локомотива. В электровозах переменного тока серий ЭС5К и ЭП1 – это выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП), у электровозов постоянного тока серий ЭС4К и ЭП2К – это силовые контакторы, у тепловозов всех серий – это дизель-генераторная установка. В алгоритмах управления МСУ предусмотрен анализ текущего режима работы, параметров оборудования и нахождения их в допуске. Таким образом, МСУ всегда производят диагностирование работоспособности локомотива в целом и отдельных его узлов. При этом МСУ – это неотъемлемая часть локомотива, и его функции диагностирования могут рассматриваться как встроенные. Но МСУ не входит в состав диагностируемого оборудования, поэтому является внешним средством диагностирования. Поэтому предлагается кроме внутренних и внешних систем диагностирования ввести понятие бортовая система диагностирования.

Как говорилось выше, диагностирование исправности всегда ограничено. Практически нет способов проверить исправность в полном объёме. Проверка работоспособности (способности объектом исполнять все свои функции) уже реальна: подавая последовательно совокупности входных сигналов X и контролируя реакцию объекта по совокупности выходных сигналов Y можно подтвердить работоспособность объекта диагностирования, локализовать место возможного отказа, спрогнозировать остаточный ресурс. Специализированные стационарные испытательные стенды и станции позволяют проверить работоспособность отдельных видов или групп оборудования локомотива. Например, стенды испытания тяговых электродвигателей (ТЭД) могут подтвердить работоспособность ТЭД, но не гарантируют его исправность. Аналогичная ситуация со стендами проверки электрических аппаратов и электронного силового оборудования, станциями реостатных испытаний дизель-генераторных установок, системами вибродиагностирования моторно-якорных, буксовых и моторно-осевых подшипников и колёсно-моторных блоков (КМБ) в целом. Переносные измерительные приборы позволяют, как правило, проверить отдельные параметры работоспособности: размер и профиль бандажа, сопротивление изоляции и др.

Возникает вопрос, а что диагностирует МСУ? Точно не диагностирует исправность. Но и работоспособность не проверяет, т.к. МСУ может проверить только те функции оборудования и локомотива в целом, которые реализовывались во время поездки. Если локомотив не работал в режиме электрического (реостатного или рекуперативного) торможения, то неизвестна её работоспособность. Ещё сложнее с такими функциями, как защита от токов короткого замыкания, перегрузки, превышения температуры, ударов молнии и др.: эти режимы могут не наступать долгое время и не наступить вообще. Таким образом, нельзя судить по данным МСУ о работоспособности локомотива и его оборудования. Можно диагностировать правильность функционирования.

К бортовым средствам диагностирования следует отнести и бортовой компьютер промышленного изготовления, устанавливаемый в каждой кабине машиниста для отображения данных о техническом состоянии локомотива. В электровозах производства (НЭВЗ, г. Новочеркасск) он даже назван «Блок индикации», хотя его функции шире обработка и хранение в энергонезависимой памяти диагностической информации. Данные блок индикации получает от МСУ, хотя также может получать от приборов безопасности (в т.ч. КЛУБ-У) и специальных бортовых систем диагностирования, например АСК у тепловозов серии 2ТЭ25КМ производства БМЗ (г. Брянск). Сейчас бортовые компьютеры оснащаются средствами передачи данных в режиме online на стационарный сервер (например, АСИМ, ЕИС КТС и др.). Это оборудование также можно отнести к средствам бортового диагностирования.

Наряду с бортовыми системами диагностирования на локомотиве есть и собственно встроенные системы. Например, преобразователь собственных нужд ПСН (по сути – статический преобразователь) имеет собственную микропроцессорную систему диагностирования с возможностью регистрации опасных режимов. МСУ также сами себя диагностируют. Реализуется встроенная диагностика и в инверторах.

Отдельно следует остановиться на понятии «Достоверность технического диагностирования (контроля технического состояния)», которое определено в стандарте как «Степень объективного соответствия результатов диагностирования (контроля) действительному техническому состоянию объекта» [14]. Всегда в диагностике существовали понятия как ошибка первого и второго рода [1, 2]. Это вероятность пропуска или ложного диагностирования отказа. Последствия у каждого рода ошибки специфические. Предлагается ввести эти понятия в стандарт.

Следует отметить необходимость уточнения и ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения» [13]. Во-первых, ввести наряду с понятиями работоспособное/неработоспособное и исправное/неисправное состояния термин «Правильное функционирование»/ «Неправильное функционирование», о чём уже шла речь. Также предлагается наряду с термином «Предотказное состояние» ввести дополнительный термин «предотказ», нашедший широкое распространение на уровне технического сленга [7 - 11].

Предоктазное состояние (предотказ) в стандарте определено как повышенный риск отказа. По сути – вероятность наступления отказа. Это определение правильное по содержанию не удобное для использования на практике. Опыт автора показал, что гораздо удобнее определение предотказа как наличие неисправности или наличие тренда к неисправности при работоспособном состоянии.

Таким образом, терминология, предлагаемая в национальных стандартах, требует дальнейшего уточнения.

Библиографический список

1. Основы технической диагностики [Текст] / Карибский В.В. [и др.] / М.: Энергия, 1976. – 464 с.
2. **Мозгалевский, А.В.** Техническая диагностика [Текст] / А.В. Мозгалевский, Д.В. Гаскаров / М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.
3. **Стрельников, В.Т.** Комплексное управление качеством технического обслуживания и ремонта электровозов [Текст] / В.Т. Стрельников, И.П. Исаев / М.: Транспорт, 1980. – 207с.
4. **Горский, А.В.** Надёжность электроподвижного состава [Текст] / А.В. Горский, А.А. Воробьёв. – М.: Маршрут, 2005. – 303 с.
5. **Четвергов, В.А.** Надёжность локомотивов / В.А. Четвергов, А.Д. Пузанков / М.: Маршрут, 2003. – 415 с.
6. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика [Текст] / К.В. Липа [и др.] / М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. – 212 с.
7. **Лакин, И.И.** Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов [Текст] дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / И.И. Лакин / М., МИИТ, 2016 – 195 с.
8. **Аболмасов, А.А.** Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / А.А. Аболмасов / М.: МИИТ, 2017 – 180 с.
9. **Пустовой, И.В.** Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / И.В. Пустовой / Омск: ОмГУПС, 2018, – 183 с.

10. **Хромов, И.Ю.** Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов [Текст] дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / И.Ю. Хромов / М.: РУТ, 2021 г. – 181 с.

11. **Семенов, А.П.** Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования. Научная монография / А.П. Семенов / Омск: ООО «Образование Информ», 2021. – 368 с.

12. Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под ред. И.К. Лакина / Красноярск: Издательство АО «ДЦВ Красноярской ж.д.», 2020 г. – 360 с.

13. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016, 63 с.

14. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.

УДК 621.896 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_76

Н.Н. Лябах, д-р техн. наук, **М.В. Бакалов,** канд. техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения)

УПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯМИ И РАЗРАБОТКАМИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ АКТИВНЫХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ)

Аннотация. *Раскрыты проблемы организации науки в области трибологии. Предложено перейти от традиционной в России «закрытой» модели осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ к модели открытых инноваций (Open Innovation), а также к модульному принципу построения инновационной продуктовой цепочки в области разработки трибологических систем. Для реализации этих организационных инноваций предлагается использовать инструментарий теории активных систем, позволяющий согласовать противоречивые интересы различных участников процесса.*

The problems of organization of science in the field of tribology are revealed. It is proposed to move from the traditional in Russia "closed" model of research and development investigations to the Open Innovation model, as well as to the modular principle of building an innovative product chain in the development of tribological systems. To implement these organizational innovations, it is proposed to use the tools of the theory of active systems that allows reconciling the conflicting interests of the various participants of the process.

Ключевые слова: трибология, модели внедрения инноваций, теории активных систем.

Keywords: tribology, models of innovation implementation, active systems theory.

Проблемы развития науки «Трибология»

Трибология – новая наука, для успешного развития которой требуется согласованное взаимодействие [1]:

- специалистов различных отраслей знаний (физиков, химиков, механиков, математиков и пр.);
- организаций различной ведомственной принадлежности и с различными, часто противоречивыми, конкурентными интересами.

Вместе с тем в трибологии еще нет устоявшихся схем и методов такого взаимодействия. Это актуализирует проблемы организации науки трибологии, повышения эффективности функционирования систем, создающих инновации в этой области.

Подтверждая этот тезис, голландский исследователь Г. Саламон отмечает, что «Трибология – это образ мышления и искусство, интеллектуальный подход к гибкой кооперации специалистов в различных областях науки и техники» [2]. То есть, возникла настоятельная потребность создать инструментарий, формализующий процессы зарождения новых идей в трибологии, их экспертный и эмпирический анализ, продвижения по всем этапам НИР и НИОКР, внедрения в практику. Необходимы механизмы:

- автоматизирующие процессы мышления (выводя их из статуса искусства, делая их достоянием широких масс исследователей);
- объективизирующие процедуры принятия решений (исключающие некомпетентность и ангажированность экспертов и руководителей организации науки и производства).

Необходимыми условиями успешного внедрения инновационных идей в трибологии являются:

- сокращение технологических разрывов в работе взаимосвязанных систем (образовательных, научных, проектно-конструкторских, внедренческих), обеспечивающих генерацию и развитие инноваций;
- снижение организационных, научных и производственных издержек за счет оптимальной организации работ;
- доведение создаваемой продукции до максимально конкурентного уровня (нужны ГОСТы и регламенты) и рыночной востребованности;
- повышение материальной привлекательности разработок (целевые гранты по теме, заказы производства).

Большинство российских компаний, к сожалению, имеют серьезное технологическое отставание (они осваивают 4-5 технологические уклады, тогда как передовые западные компании осваивают шестой технологический уклад). Для такого типа компаний приоритетной является модернизация производства путем покупки готовых технологий. Это гарантирует повышение конкурентоспособности до избранного уровня соответствующей отрасли знаний (производства) при минимизации рисков и меньшими издержками [2]. Но, заимствуя чужие технологии, можно только сократить разрыв с конкурентами-лидерами, но, очевидно, невозможно их опередить.

Трибология в этом ряду стоит на особом месте. Трудами российских ученых уже обеспечено лидирующее положение в мире и требуется ускоренное и эффективное продвижение этих идей в практику. Необходимо развить собственную систему исследований и разработок, чтобы полученные научные результаты не стали достояние других, более технологически продвинутых стран.

В исследовании [3] отражены результаты количественного исследования российских компаний, из которых следуют выводы:

- 98% респондентов указывают на наличие проблем на пути разработки и внедрения инноваций;
- 51% компаний-респондентов крупного производства и бизнеса отметили неготовность разработчиков инноваций учесть требования и подстроиться под задачи компании-заказчика;
- 47% компаний указывают на физическую нехватку высококвалифицированных разработчиков по требуемому спектру квалификаций, готовых заниматься созданием инновационных решений;
- 42% опрошенных компаний крупного бизнеса и производства указывают на отсутствие у них кадров, обеспечивающих взаимодействие с представителями науки и разработчиками инноваций;
- 33% компаний отмечают недостаток внутреннего финансирования инновационных разработок.

Проведенный анализ выявляет проблемы развития научно-производственной сферы России, которые легко проецируются на предприятия, связанные с наукой Трибология. Он

ставит задачи перед образовательным сектором страны (подготовка кадров), ее наукой (создание условий для форсирования исследований), производством (ставить задачи и своевременно воспринимать их решение), организаторами и управленцами – указанные сферы должны работать по единому плану и согласованно.

Модели разработки и внедрения инноваций

Естественным образом зародилась и хорошо развита «закрытая» модель осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Предприятия в ходе развития стремятся сохранить (обезопасить) свою собственность, в том числе интеллектуальную, капитализировать ее, что требует ограничения ее распространения.

В связи с этим, процесс обмена информационными ресурсами снижается – прогресс тормозится. Поэтому в последнее время начался процесс изменения организации корпоративных стратегий крупных компаний – реализуется переход к модели, предполагающей активное взаимодействие с внешними ресурсами – источниками новых идей и технологий. Новый подход уже достаточно сформировался, и в научно-методической литературе эта новая модель создания инноваций получила наименование Open Innovation (открытые инновации).

При этом передача знаний и технологий происходит в различных формах: «снаружи внутрь» (например, при покупке технологий), «изнутри наружу» (например, при их продаже), открытый обмен знаниями между различными субъектами. Этот процесс многостадийный, многоаспектный и требует формализации.

Наибольшее распространение получил модульный принцип построения инновационной цепочки. При этом весь технологический цикл разбивается на отдельные подсистемы, каждая из которых обладает полной независимость и может создаваться автономно от других. Реализация некоторых подсистем может быть отдана на аутсорсинг.

При этом следует отличать инновационный аутсорсинг, от его более примитивной «сборочной разновидности». Характерными примерами этого вида аутсорсинга являются многолетние программы разработки компании Boeing инновационного самолета нового поколения 787 Jetliner и его европейским конкурентом концерном EADS – создание самолета Airbus A380. Так, например, в процессе проектирования и разработки отдельных компонентов самолета 787 Jetliner Boeing привлек к совместной инновационной работе независимых бизнес-партнеров по всему миру полтора десятка различных исследовательских команд.

Таким образом, в результате проведенной структуризации проблемы мы получили совокупность модулей, выполняемых как параллельно, так и последовательно. Например, при создании новых узлов трения параллельно свои работы могут выполнять химики, физики, математики, механики, а последовательно выполняются этапы: формирование задания, НИР, НИОКР, опытная эксплуатация синтезируемого узла, его внедрение в промышленную эксплуатацию. В этой схеме есть как минимум два уровня управления, возможности которых следует учитывать, а интересы в равной степени соблюдать.

Рассмотрим далее два распространенных в настоящее время механизма разработки и внедрения инноваций. Это краудфандинг [4] и краудсорсинг [5].

Краудфандинг – это коллективное сотрудничество людей, которые добровольно объединяют свои ресурсы (финансы, материалы, инфраструктуру), чтобы поддержать усилия других людей и/или организаций, имеющих перспективные, общественно значимые проекты. Взаимодействие доноров и реципиентов осуществляется, как правило, через Интернет. Проект, выносимый для коллективного финансирования, называют стартапом.

Краудсорсинг – это также коллективное сотрудничество людей, привлеченных к решению тех или иных проблем инновационной деятельности, вкладывающих свои знания, время, опыт, труд. Они работают на добровольных началах с применением информационных технологий. Среди множества разновидностей краудсорсинга выделяются проекты для голосования и сбора идей, по обработке научных материалов, конкурсные платформы, микрозадачи, краудсорсинговые агрегаторы, справочные ресурсы, проекты по совместному использованию данных, различные формы совместной работы с контентом и поддержки коллективных инноваций. Применяется этот инструмент и на транспорте, например, с 2018 года

функционирует краудсорсиноговая платформа «Про Движение» компании ОАО «РЖД». Работа платформы направлена на сбор и разработку предложений по совершенствованию управления и повышению эффективности перевозочного процесса на сети железных дорог России. За время работы платформы подано порядка 2,5 тыс. идей, включились в работу более 9 тыс. пользователей, множество предложений находится в стадии внедрения и реализации.

К сожалению, в трибологии технологии краудфандинга и краудсорсинга еще не нашли своего должного развития. Это актуальная задача текущего момента развития теории и практики процессов трения, изнашивания и смазки.

Теория активных систем

Анализ подходов к генерации и разработке инноваций, проведенный выше, позволил выявить проблемы организации кооперации с внешними партнерами и субподрядчиками, структурировать задачу организации новых исследований. Она сведена к модульному типу организации исследовательской цепочки. Не умаляя роли иных методов, в настоящем исследовании решение части этих задач видится целесообразным с использованием инструментария теории активных систем (ТАС) [6].

Согласно [7] базовыми механизмами управления активными системами являются:

- Механизмы комплексного оценивания – важны на этапе формирования инновационной идеи и оценки итоговых результатов исследования.
- Механизмы активной экспертизы – помогают при выборе альтернативных решений.
- Механизмы формирования состава и структуры активной системы лежат в основе выделения исследовательских модулей и формирования логистической цепочки исследований.
- Тендеры, как и конкурсные механизмы распределения ресурса являются основой выбора наилучшего исполнителя.
- Многоканальные механизмы – описывают параллельную работу звеньев исследовательской цепочки.

Не требуют специального представления: механизмы распределения ресурса, в том числе не манипулируемые механизмы распределения ресурса, механизмы финансирования, механизмы внутрифирменного управления, механизмы стимулирования, механизмы обмена, механизмы оперативного управления.

В ТАС один из важнейших разделов представлен механизмами согласования противоречивых интересов взаимодействующих хозяйствующих субъектов (ХС). В качестве таковых могут выступать и физические и юридические лица. Механизмы ТАС формируют новое предназначение математическим методам исследования. Кроме традиционного численного анализа возникающих ситуаций и управления ими, ТАС способствует формированию благоприятного корпоративного климата среди разработчиков, так как исключает ангажированность сторон, некомпетентность специалистов.

В работе [8] эти механизмы развиты для согласования интересов ХС транспортно-логистических цепочек. Развитие, предложенное в [8] снимает ряд жестких ограничений на используемые модели (известный вид функции затрат, постоянная цена на реализуемую продукцию, полная реализация продукции и др.).

При этом различаются две схемы взаимодействия:

- ХС разных уровней управления. У нас, например, это могут быть Российская академия наук (верхний уровень) и конкретные разработчики трибологических систем (вузы, НИИ Академии).
-ХС одного уровня управления.

Выводы:

1. Предложено перейти к открытой форме разработке инноваций в трибологии, обеспечив сохранение интересов сторон средствами теории активных систем.
2. Проанализированы механизмы формирования инноваций: краудфандинг и краудсорсинг.

3. Процесс инновационного развития теории представлен в виде цепочки отдельных модулей, реализуемых различными хозяйствующими субъектами, что упрощает процессы декомпозиции и интеграции научных исследований.

4. Для анализа логистической цепочки модулей разработки инноваций предложено использовать инструментарий теории активных систем, регламентирующих отношения заказчика исследований (верхний уровень управления) и исполнителей (нижний уровень), а также исполнителей между собой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51014.

Библиографический список

1. **Колесников, В.И.** Теплофизические процессы в металл полимерных трибосистемах / В.И. Колесников // М.: Наука, 2003. – 279 с.

2. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие / Н.Е. Денисова [и др.] //Под общей редакцией Н.Е. Денисовой. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 72 с.

3. Управление исследованиями и разработками в российских компаниях: Национальный доклад / Е.Б. Кузнецов [и др.] //М.: Ассоциация Менеджеров, 2011. – 80 с.

4. **Мотовилов, О.В.** Феномен краудфандинга: исследование особенностей / О.В. Мотовилов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика, 2018. Вып. 2. – С. 298 – 316.

5. **Хау, Д.** Краудсорсинг. Коллективный разум как инструмент развития бизнеса = Crowdsourcing: Why the Power of the Crowd is Driving the Future of Business. / Д. Хау // М.: Альпина Паблишер, 2012. – 288 с.

6. **Новиков, Д.А.** Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков.// М.: МПСИ, 2005. – 584 с.

7. **Бурков, В.Н.** Теория активных систем: состояние и перспективы / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. М.: Синтег, 1999 – 128 с.

8. **Лябах, Н.Н.** Обеспечение экономической безопасности хозяйствующих субъектов различного уровня управления через развитие процедуры согласования противоречивых интересов / Н.Н. Лябах, М.В. Бакалов, Ю.В. Шаповалова // Труды XXVII межд. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М: Институт проблем управления им. Трапезникова РАН, 2019. – С. 142-150.

УДК 656.004.69 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_80

Н.Н. Лябах, д-р техн. наук, **М.В. Колесников,** д-р техн. наук, **М.В. Бакалов,** канд. техн. наук, **Ю.В. Шаповалова** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ АКТИВНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИЙ НА ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. *Использовано представление об инновационном развитии трибологических систем в виде цепочки последовательно и параллельно соединенных исследовательских модулей. Для согласования интересов хозяйствующих субъектов, реализующих отдельные модули, предлагается использовать механизмы теории активных систем. Проанализированы возможности и недостатки существующих подходов. Предложено их развитие, распространяющееся на два важных случая: формирование компромиссного задания для систем нижнего уровня управления (непосредственно реализующих исследовательские модули), соединенных*

последовательно; справедливое распределение нагрузки между параллельно работающими модулями с условием обязательного выполнения общего плана работ.

The idea of innovative development of tribological systems in the form of a chain of series and parallel connected research modules is used. To coordinate the interests of economic entities implementing individual modules it is proposed to use the mechanisms of the theory of active systems. The possibilities and disadvantages of existing approaches are analyzed. Their development is proposed that extends to two important cases: the formation of a compromise task for lower-level control systems (directly implementing research modules) connected in series; equitable distribution of the load between parallel running modules with the condition of mandatory performance of the general work plan.

Ключевые слова: трибология, цепочка инновационного развития теории, модули развития, теория активных систем.
Keywords: tribology, the chain of innovation development theory, development modules, theory of active systems.

В настоящее время в трибологии [1, 2] еще нет устоявшихся схем и методов успешного взаимодействия специалистов различных отраслей знаний (физиков, химиков, механиков, математиков и пр.), а также организаций с различной ведомственной принадлежностью, что затрудняет развитие теории и внедрение ее в практику, так как участники этого сложного процесса имеют различные, часто противоречивые, конкурентные интересы. Действительно, проблемы трения и износа исследуются в различных отраслях народного хозяйства и различными научными учреждениями: вузами, научно-исследовательским институтами Российской академии наук, отраслевыми научными организациями.

В связи с этим предложено перейти от существующей в настоящее время «закрытой» модели осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме к модели открытых инноваций, а также к модульному принципу построения инновационной продуктовой цепочки [3] в области разработки трибологических систем. Этот подход позволит получить ряд позитивных эффектов:

- Исключить дублирование исследований.
- Сформировать положительный синергетический эффект объединения научных сил и ресурсов.
- Систематизировать исследования по теме и разработать комплексный план развития трибологии.
- Структурировать процесс разработки и внедрения в практику народного хозяйства инноваций, используя логистические принципы организации производства (логистическую цепочку составляют выделенные исследовательские модули).

Негативный эффект предложенного подхода заключается в высокой уязвимости открытых исследований (они в большей мере подвержены плагиату и недобросовестному использованию). Сохранение частных интересов сторон (авторское право, ноу-хау, товарные знаки и пр.) предлагается обеспечивать при этом средствами теории активных систем (ТАС) [4]. ТАС регламентирует отношение хозяйствующих субъектов (ХС) как различных уровней управления, так и одного уровня.

Методы, изложенные в [4] имеют ряд жестких ограничений на используемые модельные конструкции, редко выполняемые на практике. К ним, в частности, относятся: детерминированная постановка задачи (без учета ошибок данных, влияния случайных факторов), квадратичный вид функции затрат на производство продукции (у нас: производство инноваций), постоянная цена на реализуемую продукцию, полная реализация выпущенной продукции и др.

В работе [5] развит метод, снимающий часть этих ограничений и использованный для согласования интересов ХС разных уровней управления транспортно-логистическими цепями перевозки грузов. Универсальность метода в нашем случае позволяет использовать его в процессе развития теории и инструментария трибологии для согласования интересов,

например, Российской академии наук, координирующей исследования по трибологии (верхний уровень управления научными исследованиями), и отдельных разработчиков проблемы (вузы, НИИ), реализующими ее частные модули.

В работе [6] этот метод развит для согласования интересов ХС одного уровня управления. В нашем случае это или ХС, последовательно выполняющие задачи одной проблемы или ХС, параллельно решающие одну проблему.

Этот метод позволяет компенсировать следующие недостатки механизмов, описанных в [4], [5] и [6]:

- Верхний уровень управления не учитывает интересов ТС нижнего уровня (план спускается сверху). Основная идея этого метода обеспечить обязательность выполнения плана путем назначения подходящих штрафных санкций для ХС нижнего уровня.

- Нет сравнения интересов ХС нижнего уровня. Они, как правило, различны. А, очевидно, что при последовательном соединении звеньев возможности наиболее слабого звена определяют и возможности всей цепи. При параллельном соединении звеньев такое сравнение позволит рационально распределить нагрузку между ними.

Теперь задача верхнего уровня управления состоит в расчете общей нагрузки цепи инновационного развития с максимальным учетом интересов всех участников разработки теории и внедрения ее в практику. Традиционно для этой цели применяются различные стратегии поиска оптимальных решений, использующие:

- Инструментарий теории игр [7], позволяющий классифицировать решения по классам, например, «согласованные» и «несогласованные».

- Различные модификации методов Парето нахождения множества не улучшаемых решений [8].

- Принцип максимума Понтрягина [9].

- Различные методы программирования (линейного, нелинейного, динамического, целочисленного) [10-11] и др.

Для успешного применения этих подходов не всегда имеется необходимая для адекватного моделирования информация. Например, для применения принципа максимума Понтрягина модель процесса должна быть задана дифференциальными уравнениями (то есть быть детерминированной, с известной структурой и параметрами), а критерий оптимизации должен быть описан в виде интеграла (те же требования).

В этой связи рациональное распределение заданий между ХС, будем осуществлять средствами ТАС.

Возможны две различные постановки задачи:

1. Рассматривая системы нижнего уровня управления, соединенные последовательно, определить для них компромиссное задание.

2. Для параллельно работающих ТС определить справедливое распределение нагрузки с условием выполнения плана работ.

Рассмотрим случай 1. Пусть в данной цепочке развития инноваций каждый *i*-ый ХС (модуль) характеризуется квадратичным критерием функционирования, приведенным к виду [4]:

$$y = -m_i(x - a_i)^2 + b_i, \qquad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{1}$$

В [4] для этого случая рассчитаны области согласованных решений, которые задаются соотношениями (2):

$$x_{\Gamma i} = a_i + (b_i(1 - k_i)/m_i)^{0,5}. \tag{2}$$

Так как, при последовательной работе все модули цепи выполняют один объем работы, то все $x_{\Gamma i}$ равны между собой. Компромисс между модулями будет достигнут, если все штрафные коэффициенты k_i также равны между собой, то есть

$$x_{\Gamma i} = x_\Gamma \text{ и } k_i = k. \tag{3}$$

Минимальное число звеньев цепи n = 2. При этом будем иметь два уравнения вида (2) с двумя неизвестными x_Γ и k. Решая эту систему уравнений, найдем искомые неизвестные.

Пример 1: Пусть имеем цепочку исследовательских модулей, состоящую из двух последовательных звеньев. Первая характеризуется параметрами: $m_1 = 0,2,\ a_1 = 2,\ b_1 = 5,$ а для второго звена соответственно имеем: $m_2 = 0,1,\ a_2 = 1,\ b_2 = 10.$ Найти согласованные значения k и $x_Г$.

На основании (2) и (3) и данных примера имеем систему уравнений:

$$x_Г = 2 + (5(1 - k)/0,2)^{0,5} \quad \text{и} \quad x_Г = 2 + (5(1 - k)/0,2)^{0,5}.$$

Ее решение: $k = 24/25,\ x_Г = 3.$

Если цепь модулей содержит более трех звеньев, то получаем систему уравнений соответствующей размерности, но также с двумя неизвестными. В общем случае это система несовместных уравнений. В этом случае вводится понятие обобщенного решения. Обобщенным решением несовместной системы называется решение, которое минимизирует сумму квадратов отклонений левых и правых частей заданной системы уравнений.

Рассмотрим вторую постановку задачи. Теперь мы имеем n параллельно работающих звеньев (ХС, модулей), описываемых уравнениями вида (2). Справедливость распределения заданий между звеньями требует, чтобы все $k_i = k$. Критичным для практики является случай, при котором нагрузка C на исследовательскую цепь, параллельно соединенных звеньев, превышает суммарные интересы (их оптимальные значения) обслуживающих его звеньев. То есть, исходим из того, что выполняется неравенство:

$$C > \sum_1^n a_i . \tag{4}$$

В этом случае каждое звено будет работать с перегрузкой (то есть «под давлением штрафного коэффициента k_i»). Справедливо будет принять равенство всех коэффициентов k_i для всех параллельно работающих ХС. При этом границы согласованных планов $x_{Гi}$ также *при* этом будут различны.

Следует определить коэффициент $k = k_i$, при котором выполняется равенство:

$$C = \sum_1^n x_{Гi} . \tag{5}$$

Что означает выполнение задание группой параллельно работающих звеньев. Получаем систему с $n + 1$ неизвестным (n значений $x_{Гi}$ и неизвестное k) из $n + 1$ уравнений: n уравнений вида (2) и одно уравнение (5). Решение этой системы при условии $k_i = k$, дает искомые значения k и $x_{Гi}$.

Пример 2. Рассмотрим случай двух параллельных каналов исследования. Пусть у этих каналов характеристики те же, что и в примере 1. То есть: $m_1 = 0,2,\ a_1 = 2,\ b_1 = 5,$ и $m_2 = 0,1,\ a_2 = 1,\ b_2 = 10.$

Найти значение k, при котором оба звена совместно выполнят задание объемом $C = 4$.

Имеем три уравнения (два вида (2) и одно вида (5)) с неизвестными $k,\ x_{Г1}$ и $x_{Г2}$:

$$x_{Г1} = 2 + 5(1 - k)^{0,5},\quad x_{Г2} = 1 + 10(1 - k)^{0,5},\quad x_{Г1} + x_{Г2} = 4.$$

Из решения этой системы уравнений следует: $k = 224/225,\ x_{Г1} = 7/3,\ x_{Г2} = 5/3.$

Пример 3. Пусть теперь по результатам статистических наблюдений за работой двух модулей, участвующих в создании инновационного продукта, с помощью регрессионных методов получены зависимости результата y_i от объемов вложенных средств x. Получили:

$$y_1 = 50 + 10x - 0,5x^2 \ , \tag{6}$$

$$y_2 = 34,4 + 6,4x - 0,4x^2 \ . \tag{7}$$

Выделим полные квадраты в выражениях (6) и (7) – преобразование (1). Получим соответственно (8) и (9):

$$y_1 = -\ 0,5(x - 10)^2 + 100 \ , \tag{8}$$

$$y_2 = -\ 0,4(x - 8)^2 + 60 \tag{9}$$

Результаты этих расчетов можно трактовать следующим образом: оптимальным случаем является выделении средств первому звену в объеме $x = 10$ усл. ед. Оно даст результат $y = 100$ усл. ед. Аналогично для второго звена $y(8) = 60$ усл. ед. Таким образом, в оптимальном режиме функционирования два исследуемых параллельных модуля дадут результат в объеме 18 усл. ед. Положим, что необходимо совместными усилиями получить результат в объеме $C = 24 > 18$ усл. ед.

Расчеты, проведенные согласно разработанной методике по соотношениям (5), (8), (9), (2), (3) дают значения k = 0,95, $x_{Г1}$ = 13,25, $x_{Г2}$ = 10,82. При этом, если звенья выполнят свои планы, то ими будут получены следующие результаты:

$$y_1(x_{Г1} = 13{,}25) = 94{,}72;$$
$$y_2(x_{Г2} = 10{,}82) = 56{,}82.$$

Если же звенья не выполнят установленные планы, а сориентируются на благоприятные для них значения x_1 =10 усл. ед. и x_2 = 8 усл. ед., то их выигрыши соответственно составят:

$$y_{1ш}(10) = 89{,}72;$$
$$y_{2ш}(8) = 53{,}82.$$

Очевидно, что в этом случае каждый исполнитель проигрывает соответственно 4,74% и 1,70%. Следовательно, разработанный механизм показывает свою работоспособность и позволяет согласовывать противоречивые интересы ХС.

Для оценки возможностей каналов-модулей инновационного развития следует рассматривать их различные показатели: финансовые (себестоимость, рентабельность), производственные (объемы переработки), надежности, живучести, безопасности и др.

Выводы:

Поставлены и решены две задачи развития инновационного процесса создания научно-технической продукции:

1. Определение компромиссного задания для последовательно соединенных исследовательских модулей нижнего уровня управления.

2. Определение справедливого распределения нагрузки параллельно работающих модулей с условием выполнения общего плана работ.

Приведены иллюстративные примеры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51014.

Библиографический список

1. **Колесников, В.И.** Теплофизические процессы в металл полимерных трибосистемах / В.И. Колесников// М.: Наука, 2003. – 279 с.

2. Труды XIII Международной научно-технической конференции: Трибология – машиностроению. – М.: ИМАШ РАН, 2020. – 376 с.

3. **Переходов, В.Н.** Основы управления инновационной деятельностью / В.Н. Переходов // М.: ИНФРА-М, 2015. – 222 с.

4. **Новиков, Д.А.** Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков // М.: МПСИ, 2005. – 584 с.

5. **Лябах, Н.Н.** Моделирование деятельности транспортных предприятий / Н.Н. Лябах, М.В. Колесников, М.В. Бакалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). – 2018. – № 1(69). – С. 72–77.

6. **Лябах, Н.Н.** Обеспечение экономической безопасности хозяйствующих субъектов различного уровня управления через развитие процедуры согласования противоречивых интересов / Н.Н. Лябах, М.В. Бакалов, Ю.В. Шаповалова // Труды XXVII межд. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М: Институт проблем управления им. Трапезникова РАН, 2019. – С. 142-150.

7. **Мазалов, В.В.** Математическая теория игр и приложения / В.В. Мазалов // Санкт-Петербург - Москва - Краснодар: Лань, 2010. – 446 с.

8. **Ногин, В.Д.** Множество и принцип Парето: учебное пособие / В.Д. Ногин // СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. – 100 с.

9. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л.С. [и др.] // М.: Наука, 1969. – 384 с.

10. **Богданова, Е.Л.** Оптимизация в проектном менеджменте: линейное программирование: учебное пособие / Е.Л. Богданова, К.А. Соловейчик, К.Г. Аркина // СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 165 с.

11. **Богданова, Е.Л.** Оптимизация в проектном менеджменте: нелинейное программирование: учебное пособие / Е.Л. Богданова, К.А. Соловейчик, К.Г. Аркина. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 178 с.

УДК 656.078.12 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_85

Е.Е. Мизгирева (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ КРУПНЫХ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ

Аннотация. *Рассмотрена роль транспортных узлов в рамках развития городских агломераций, проанализированы информационные технологии, применимые в рамках проекта «Цифровой железнодорожный узел. Исследованы различные подходы к определению процесса развития транспортного комплекса, принципы устойчивости и управляемости. Проанализирована современная классификация транспортных узлов.*

The role of transport hubs in the development of urban agglomerations is considered, information technologies applicable within the framework of the Digital Railway Hub project are analyzed. Various approaches to the definition of the process of development of the transport complex, the principles of stability and controllability are investigated. The modern classification of transport hubs is analyzed.

Ключевые слова: транспортный узел, информационные технологии, классификация.
Keywords: transport hub, information technology, classification.

Лицом любого современного города является его транспортная система: насколько хорошо взаимодействуют между собой различные виды транспорта, рационально ли составлены маршруты общественного транспорта, насколько остро стоят проблемы пробок, качества подвижного состава, транспортного полотна и многое другое. В идеале транспортный узел – выверенный механизм, в котором органично курсируют и пассажиры, и грузы. Однако транспортные узлы формировались веками, на этот процесс влияли климатические, географические, исторические и другие факторы, потому важные промышленные объекты с течением времени, вдруг оказываются в густонаселенном районе города, окутанном мелкой сетью узких дорог или когда-то крупная железнодорожная станция становится узким местом и камнем преткновения в вопросе строительстве обхода.

В настоящее время успешно реализуется проект «Цифровая Железная Дорога». Основной его целью является внедрение на железной дороге современных цифровых технологий и повышение, с их помощью, эффективности работы.

Цифровая трансформация – необходимая ступень в развитии деятельности ОАО «РЖД». Современные условия цифровой экономики побуждают к развитию в данной сфере посредством внедрения различных инноваций, разработке новых бизнес-процессов, формировании новой корпоративной культуры. Одной из задач реализации программы цифровизации является создание не менее 10 национальных компаний-лидеров – высокотехнологичных предприятий, развивающих «сквозные» технологии и управляющих цифровыми платформами.

Мир вступил в эпоху 4-й промышленной революции. В современном мире технологии связывают физический и цифровой миры в единую систему. Шагая в ногу со временем и отвечая

на развитие технологий современности, ОАО «РЖД» преобразует Компанию в киберфизическую систему, которая базируется на проекте Цифрового железнодорожного узла.

Задачи проекта включают в себя: повышение качества транспортно-логистических услуг, увеличение надежности, а также безопасности движения и информационной безопасности, использование интеллектуальных систем в процессе перевозок для увеличения пропускной и провозной способности, повышение производительности труда и уменьшение «человеческого фактора» в работе железной дороги, за счет внедрения информационных систем управления.

В соответствии с [2] представлены целевые показатели проекта «Цифровая железная дорога» к 2024 году: в поездах дальнего следования продажа электронных билетов достигнет 70 процентов; доля услуг грузовых перевозок и сопутствующих сервисов, доступных к оформлению в электронном виде – 75 %; доля электронных документов при взаимодействии с участниками перевозочного процесса, в том числе международные транзитные перевозки – 90 %; доля операций в бизнес-процессах обслуживания клиентов, выполненных без участия человека – 55 %.

Цифровой железнодорожный узел представляет собой киберфизическую систему трансформации объектов Компании в соответствии с принципами и трендами четвертой промышленной революции. Цифровой железнодорожный узел – комплекс взаимосвязанных сквозных информационных технологий с максимальной автоматизацией технологических процессов и цифровизацией технологических операций.

Можно выделить следующие цели проекта цифровой железнодорожный узел: переход к автоматизации управления работы железнодорожного узла, работы по оптимизации технологических процессов и увеличение эффективности использования пропускной способности станции и тяговых ресурсов. Основными задачами проекта Цифровой железнодорожный узел являются реализация комплексных интеллектуальных систем планирования и прогнозирования, непрерывный мониторинг состояния технических средств, подвижных единиц и работников, использование технического зрения, внедрение малолюдных технологий, переход на электронный документооборот и безбумажные технологии, повышение уровня безопасности движения и производства работ в опасных зонах за счет снижения влияния человеческого фактора в технологических процессах, оснащение персонала средствами контроля местоположения и ведение единой модели расположения работников, находящихся в опасных зонах и создание сквозных информационных технологий.

Информационные технологии могут ощутимо помочь в выборе решений и воздействовать на интеллектуализацию транспортных процессов. К сожалению, сейчас такие технологии недостаточно развиты. Это можно исправить, если использовать некоторые инструменты, технологии и программы «Цифровой железной дороги», такие как: OLAP-технологии; RoboticProcess Automation – роботизация бизнес-процессов; Data Mining и Macine Learning (машинное обучение); Big Data; нейронные сети; механизм мониторинга полигона [3].

В России с её огромной территорией значение транспорта огромно, так как он объединяет в единый комплекс буквально все отрасли экономики, обеспечивает не только нормальную жизнедеятельность государства, но и его национальную безопасность и целостность [4]. Существуют два основных подхода к определению процесса развития транспортного комплекса: механистический и эволюционный.

Следует отметить, что современное определение транспортного узла является неполным, не раскрывающим сути и механизмов функционирования. Согласно [5], транспортным узлом называется комплекс транспортных устройств в пункте стыка нескольких видов транспорта, совместно выполняющих операции по обслуживанию транзитных, местных и городских перевозок грузов и пассажиров. В нашем исследовании мы хотим дать новое определение. Давая определение транспортного узла, следует руководствоваться системным подходом. Транспортный узел – сложная многокомпонентная система взаимодействующих между собой различных видов транспорта, расположенная в пределах крупной городской агломерации.

На современном этапе транспортная отрасль России нуждается в развитии, а также в повышении конкурентоспособности на мировом рынке транспортных услуг. Для этого необходим поиск эффективных решений проблемы, разработка эффективных программ модернизации.

Рис. 1. Подходы к определению процесса развития транспортного комплекса

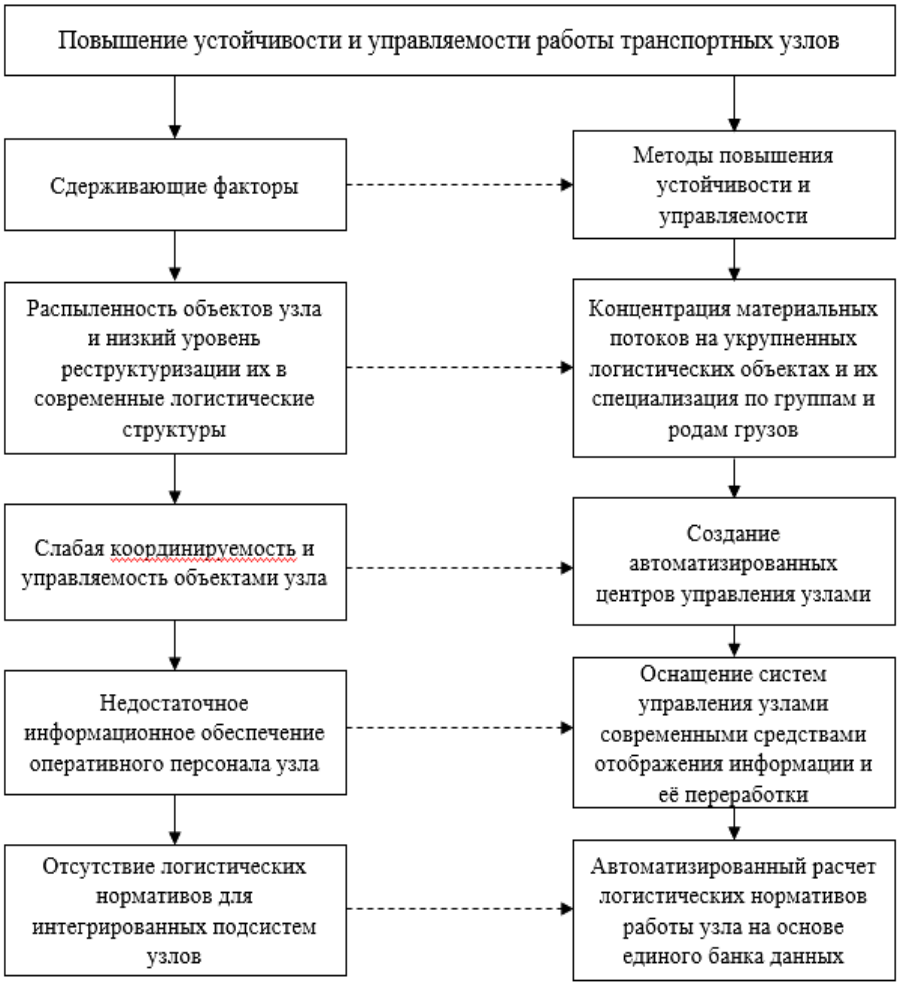


Рис. 2. Принципы устойчивости и управляемости работы транспортных узлов

Международная глобализация экономических связей определяет необходимость развития транспортных систем на новых принципах взаимодействия. Одним из ключевых факторов развития как регионов, так и страны в целом является эффективно функционирующий транспорт. Известно, что Россия расположена на пересечении международных направлений, транспортировки грузов, которые имеют огромную важность как для нашей страны, так для международного рынка в целом. Это определяет Российскую Федерацию как государство с перспективными технологиями организации перевозочного процесса. Но в связи с этим возникает ряд проблем, связанных с поиском наилучшего сочетания используемых видов транспорта и оптимизации инфраструктуры.

Транспортная система тесно связана с производственными системами, развивающимися в обслуживаемом регионе. Она обеспечивает движение по схеме «ресурсы - промежуточные продукты - конечные продукты», что порождает прямые и обратные связи с производством. Задачей транспортной системы в технологическом аспекте является пространственное перемещение материальных потоков между производственными комплексами. Первостепенная цель современной транспортной системы – обеспечить производственные комплексы транспортным обслуживанием исходя из производственной необходимости каждого конкретного клиента. Сюда можно отнести возможность принимать и выдавать груз в разных режимах, что актуально для подсистемы железнодорожного транспорта, который может наиболее полно брать на себя комплексное транспортно-логистическое обслуживание клиентов, снижая их складские затраты и производственно-коммерческие запасы, экономя оборотные средства [6].

Стоит отметить, что транспортный узел – это уникальное транспортно-технологическое образование. В настоящее время действует система классификации, которая включает в себя пять параметров оценки транспортного узла [7], которые являются довольно спорными, учитывая современные тенденции развития, например, геометрический признак и характер эксплуатационной работы. Современная классификация транспортных узлов приведена на рисунке 3. Необходимо разработать принципиально новую и более перспективную системную классификацию транспортных узлов на основе модифицированных показателей схем и уровней организации транспортной работы [8].

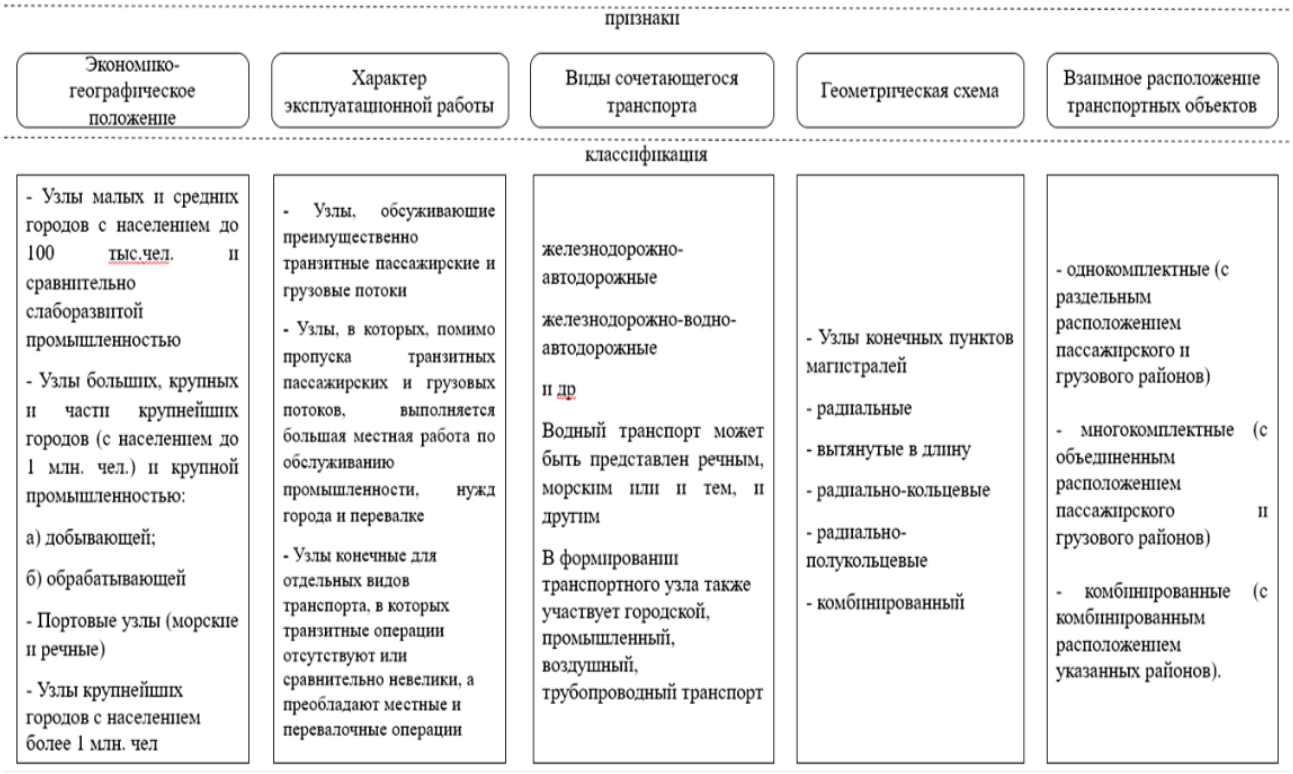


Рис. 3. Классификация транспортных узлов

Заключение

Комплексное развитие всех видов транспорта в узлах имеет исключительно важное значение и должно осуществляться на основе установления режимов перевозки грузов и пассажиров на всем пути следования от пунктов зарождения до пунктов погашения. Технологический процесс работы транспортного узла определяется общим грузооборотом, его структурой и данными о пунктах зарождения и погашения грузопотоков. Основное требование при комплексном развитии устройств разных видов транспорта в узлах состоит в обеспечении постоянного соответствия их технического оснащения намечаемым объемам работы.

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года N 1734-р
2. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога», ОАО «РЖД», Москва, 2017. – 92 с.
3. **Розенберг, Е.Н.** Цифровая экономика и цифровая железная дорога / Е. Н. Розенберг, В. И. Уманский, Ю. В. Дзюба // Транспорт Российской Федерации, 2017. – №5 (72). С. 45-49.
4. **Жардемов, Б.Б.** Теоретические основы развития железнодорожных станций и узлов: автореферат дис. д-ра техн. наук: 05.22.08 / Б.Б. Жардемов // Моск. гос. ун-т путей сообщ. - Москва, 1999. - 48 с.
5. Транспортная система [электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki / Транспортная_система (дата обращения: 29.10.2021).
6. **Петров, М.Б.** Методология организации региональной транспорт-ной системы: автореф. дис. д-ра техн. наук / М.Б. Петров // М.: МИИТ, 2004. – 48 с.
7. **Савченко, И.Е.** Железнодорожные станции и узлы / И.Е. Савченко, С.В. Земблинов, И.И. Страковский – М.: Транспорт, 1980. – 479 с.
8. **Хан, В.В.** Обоснование рациональных структур и организации транспортно-технологических процессов железнодорожных узлов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.22.01 / В.В. Хан // Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т путей сообщ. - Ростов-на-Дону, 2016. – 23 с.

УДК 656.22 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_89

М.П. Поярков (Акционерное общество «Федеральная пассажирская компания»)

ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Аннотация. *Пассажирский комплекс находится в фазе активного развития. Это касается не только маршрутов, предоставляемых услуг и сервисов, но и подвижного состава, который должен отвечать требованиям наших клиентов.*

The passenger complex is in a phase of active development. This applies not only to routes, services and services provided, but also to rolling stock, which must meet the requirements of our customers.

Ключевые слова: двухэтажный вагон, двухвагонный сцеп, двухэтажный поезд, подвижной состав, пассажиропоток, долгосрочный договор.
Keywords: double-deck car, two-car trailer, double-deck train, rolling stock, passenger traffic, long-term contract.

Пассажирский железнодорожный транспорт играет решающую роль в обеспечении доступности регионов Российской Федерации, росте подвижности населения, а также способствует развитию национального туризма.

Проектом транспортной стратегии Российской Федерации до 2035 года прогнозируется продолжение роста перевозок всеми видами транспорта (до 528 млн. пассажиров в год), в том числе доля перевозки пассажиров железнодорожным транспортом должна увеличиться до 32%, в первую очередь – за счет развития городских агломераций и меняющейся в связи с этим маршрутной сети.

На фоне конкуренции с гражданской авиацией и автобусными перевозчиками основными задачами АО «ФПК» сегодня являются внедрение инновационного подвижного состава, а также принятие активных мер по увеличению доли железнодорожного транспорта. Для этого у Компании есть все необходимые ресурсы – производственная база, квалифицированный коллектив, парк вагонов, который при поддержке ОАО «РЖД» активно обновляется.

В ответ на обозначенные вызовы мы разработали Стратегию развития на период до 2030 года, которая утверждена советом директоров в декабре 2019 года. Стратегия предусматривает органический рост по всем показателям, в том числе рост объема перевозок.

С учетом накопленного опыта и результатов текущего года основными драйверами развития станут:

1. Дневные экспрессы (как правило, с местами для сидения, между региональными центрами с длительностью поездки от 4 до 7 часов);

2. Ночные экспрессы (спальные вагоны с длительностью поездки 1 ночь, также между агломерациями на расстоянии до 1500 км);

3. Скоростные дневные поезда внутри агломераций и между крупными городами (вагоны с местами для сидения);

4. Традиционные дальние пассажирские поезда, связывающие по маршруту населенные пункты и предлагающие современный уровень комфорта и услуг.

Дневные поезда пользуются постоянным спросом у пассажиров – до наступления пандемии средний темп роста по ним ежегодно составлял порядка 20%. Дневные поезда, по большей части, являются скоростными.

Двухэтажные поезда – как стратегическое направление –продолжали пополнять маршрутную сеть компании и в условиях пандемии. Объем перевозок в 2020 году такими поездами сократился незначительно, чему также способствовала возможность размещения пассажиров в вагонах согласно всем противоэпидемиологическим мероприятиям.

В 2021-2022 году планируется обновление подвижного состава на двухэтажный по 4 маршрутам, в том числе Оренбург – Москва, Ульяновск – Москва, Чебоксары – Москва, а также Йошкар-Ола – Москва.

Основными факторами при определении направлений развития и улучшения подвижного состава Компании являются:

а) отзывы и ожидания пассажиров

анализ которых проводится с использованием CRM и в рамках опроса фокус-групп.

Основные жалобы пассажиров относятся к неудовлетворительной работе туалетных комплексов (24,0%), систем кондиционирования воздуха (8,7%), освещения (3,5%), состоянию обивки сидений (2,4%), окон (1,2%), мест для хранения багажа (1,2%) и спальных полок (0,5%). Решения при формировании технических требований и технических заданий приняты на основании ключевых «Болевых точек» с точки зрения пассажира.

б) опыт эксплуатации

который заключается в анализе ранее разработанных технических требований и отзывов работников поездных бригад и персонала, производящего ремонт и техническое обслуживание вагонов.

в) международные практики

которые основаны на анализе технических спецификаций к сравнимым поездам зарубежных железнодорожных операторов.

На основании перечисленных факторов определены следующие инновационные области технического развития и сервисного оснащения пассажирского подвижного состава:

Внедрение новых услуг и сервисов для пассажиров, таких как:

Комплектация и оснащенность вагона:

- система обеспечения микроклимата: индивидуальная вентиляция для каждого пассажира или покупейное регулирование температуры;
- продуманное и регулируемое освещение, комфортное для пассажира и персонала;
- улучшение санитарно-гигиенических условий;

Общее пространство вагона:

- эргономика, обеспечивающая удобство перемещения по вагону;
- сегментирование пространства вагонов под потребности конкретных групп пассажиров;
- специализированные зоны для размещения крупногабаритного багажа;

установка вендинговых и прокатных автоматов.

Дизайн и интерьер:

- передовые дизайнерские концепции;
- новые планировки пассажирских пространств с целью персонализации;
- функциональность элементов интерьера.

Следующая область развития – это улучшение условий работников поездных бригад в пути следования.

Внутривагонные системы:

- информационная система записи, хранения и воспроизведения аудио контента и переговоров по радиостанции;
- система оперативного пресечения курения;
- система контроля, диагностики и управления;
- оборудование вагонов стиральными машинами, гладильными и душевыми комнатами;
- встроенные в интерьер витрины для чайной и сувенирной продукции.

Развитие системы технического обслуживания и ремонта.

Кузов вагона:

- антикоррозионное покрытие основных соединений (рама вагона, рама тележки, подвагонное оборудование);
- оптимизация организации подвагонного пространства для минимизации налипания снега и обледенения в зимний период;

Ходовые части и тормоза:

- требование повышенного пробега между сменами тормозных накладок;
- повышенная износостойкость колесных пар;
- легкость доступа к ходовой части и подвагонному оборудованию для контроля тех. состояния (уход от смотровых канав).

Комплексные решения:

- оборудование вагона системой предиктивной диагностики;
- снижение сроков восстановления работоспособности оборудования.

Полученные результаты данной работы позволят повысить технические параметры, предусмотренные нормативной документацией.

К таким параметрам относятся:

- температурный диапазон работы части оборудования и работа ЭЧТК при низких температурах.

Испытания климатических установок (по ГОСТ 33885-2016) проводятся при t до + 40 °С, но прошедшим летом при t° окружающего воздуха +40° температура в местах установки

оборудования (под крышей) поднималась до +70 °С, что приводило к массовым срабатываниям защиты и переводу УКВ в ручной режим.

- уровень шума внутри и снаружи вагона установлен нормативными документами не выше 60 дБА и 84 дБА соответственно.

Сегодня вырабатываются решения по снижению шума во внутреннем пространстве вагона и снаружи при движении до уровня не выше 55 дБА (на основании полученных результатов приемочных испытаний двухэтажного вагона модельного ряда «2020» на соответствие требованиям санитарных правил СП 2.5.1198-03);

- плавность хода пассажирского вагона регламентирована ГОСТом на уровне 2,8–3,25 единиц.

С учетом уже реализованных производителем технических решений (пневматическое подвешивание) появляется возможность увеличения установленной плавности хода до показателя 2,5–2,8. Кроме того, ФПК предлагает провести работу по определению эффектов от использования пневмоподвески в части воздействия на инфраструктуру и определению дальнейшего улучшения плавности хода;

- Существующими на сегодняшний день нормативными документами не регламентирована необходимость сохранения полноценного жизнеобеспечения вагона при прекращении внешнего электроснабжения;

С учетом экологической стратегии ОАО «РЖД» при подготовке требований к новому подвижному составу в современных реалиях сформированы требования к вагоностроительным предприятиям по наличию в вагонах оборудования для раздельного сбора мусора и устройств для его прессования.

Принимая во внимание эпидемиологическую ситуацию в мире, в дальнейшем предлагается проработать возможность реализации покупейной системы вентиляции и фильтрации воздуха, озонаторов и увлажнителей воздуха, тепловизоров в вагоне, оборудование каждого купе и санитарно-гигиенических модулей кварцевыми лампами и оснащение вагонов аппаратами для дезинфекции рук с бактерицидным облучателем-рециркулятором.

В рамках создания экономически целесообразной модели, ведется работа по увеличению межремонтных пробегов современных вагонов, которая позволила нам, начиная с текущего года, перейти к абсолютно новой, инновационной схеме работы с поездами (по пробегу), начать изменения в схемах оборота и формирования, что позволяет повысить эффективность его использования, обеспечить снижение себестоимости перевозки и, как следствие, предложить пассажирам привлекательные цены на билеты.

Одним из основных направлений по повышению эффективности эксплуатации подвижного состава является оборудование его системой контроля, диагностики и управления (СКДУ). На сегодняшний день пятая часть парка вагонов АО «ФПК» уже оборудована данной системой. Проводится плановая работа по оборудованию системой видеонаблюдения и регистрации (СВНР).

Данные изменения конструкции вагонов и периодичности их ремонта позволяют пересмотреть имеющиеся сегодня в Компании вагоноремонтные мощности, привести количество ВЧД в соответствие с потребностями, при этом обновив и модернизировав «опорные» депо и ПТО.

Введение в конструкцию вагонов принципиально новых систем и узлов потребует реализации представленных на слайде мероприятий по дооснащению и развитию инфраструктуры следующих предприятий компании: депо Санкт–Петербург Московский, Самара, Адлер.

Для эффективного достижения поставленных целей и повышения качества обслуживания пассажиров АО «ФПК» интенсивно осуществляет обновление парка вагонов, в том числе инновационным подвижным составом с улучшенными потребительскими свойствами.

Закупка подвижного состава осуществляется в соответствии с условиями долгосрочного договора на поставку подвижного состава, заключенного между АО «ФПК» и ОАО «ТВЗ». Договором предусмотрена поставка 3 731 вагона в течение 7 лет.

По состоянию на сегодня уже поставлено 1 256 вагонов.

Даже в условиях пандемии Компания не снижала объем инвестиционной программы, четко следуя стратегическому вектору на обновление подвижного состава.

Изменения маршрутной сети Компании позволяет перейти к эксплуатации инновационного перспективного подвижного состава партии «2023», в рамках которой запланировано создание как одноэтажных вагонов в габарите Т, так и двухэтажных вагонов локомотивной тяги в габарите Тпр с верхним очертанием габарита Тб, а также подвижного состава типа Push-Pull [Пуш-Пул] и электропоездов дальнего следования.

Таким образом:

Перспективная бизнес-модель АО «ФПК» в Европейской части – дневные скоростные поезда с ростом доли МВПС.

На направлении «Центр-Юг» АО «ФПК» развивается сеть скоростных двухэтажных электропоездов.

С учетом высвобождения парка вагонов требуется развитие инфраструктуры под двухэтажные вагоны за Уралом.

УДК 625.7/.8 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_93

Е.В. Углова, д-р техн. наук, **А.Н. Тиратурян,** канд. техн. наук, **А.В. Воробьев** (Донской государственный технический университет)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ РАССЕИВАЕМОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ УЧАСТКА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. *В настоящие время принципиально важной задачей в дорожной отрасли является оценка и мониторинг состояния нежестких дорожных одежд, особенно с переходом на увеличенные сроки службы автомобильных дорог вопрос мониторинга приобрел особую актуальность, что способствовало совершенствованию существующих и разработке новых методов мониторинга состояния нежестких дорожных конструкций. Применение ранее разработанного метода мониторинга является основной целью экспериментального исследования, рассмотренного в данной статье.*

В предлагаемом методе мониторинга состояния нежестких дорожных одежд основным и эффективным параметром является плотность рассеиваемой энергии, определяемая исходя из площади динамической петли гистерезиса. В результате исследования среднесрочного многофакторного мониторинга участка автомобильной дороги М-4 «ДОН» была выявлена динамика ухудшения состояния дорожной конструкции.

Полученные результаты комплексного анализа исследования позволяют сделать вывод, что показатель плотности рассеиваемой энергии на поверхности дорожной одежды непосредственно связан с ее эксплуатационным состоянием.

At present, a fundamentally important task in the road sector is the assessment and monitoring of the state of non-rigid pavements, especially with the transition to extended lifespan of highways, the issue of monitoring is of particular relevance, which requires the improvement of existing and the development of new indicators effectively characterizing the state of non-rigid pavement at the operation stage.

A five-year monitoring of the condition of the exploited road section was performed, including the analysis of the visual state and the actual overall elastic modulus of the non-

rigid road pavement. In the framework of the conducted research, it was established that the density of energy dissipated, determined on the basis of the area of the dynamic hysteresis loop recorded on the pavement surface, effectively characterizes the actual condition of the pavement.
During the monitoring of the technical and operational condition of the road section, the rates of deterioration of the operational status in terms of indicators, the average score for visual assessment, the overall modulus of elasticity on the pavement surface, and the energy dissipation density, determined based on the area of dynamic hysteresis loops recorded FWD loading.

Ключевые слова: дорожная одежда, технический мониторинг, остаточный ресурс, плотность рассеиваемой энергии, петля динамического гистерезиса.
Key words: pavement, technical monitoring, residual life, density, dissipation energy, dynamic hysteresis loop.

Введение

Вопросы мониторинга эксплуатационного состояния различных дорожных конструкций в ходе их эксплуатации всегда являлись актуальными для специалистов дорожной отрасли, т.к. несмотря на относительную развитость существующих механистических и механико-эмпирических подходов к проектированию дорожных одежд, только реальный опыт их эксплуатации, может адекватно показать эффективность или неэффективность принятых решений. В контексте этой проблемы все очевиднее становится, что существующие на данный момент методы и показатели, характеризующие структурное состояния дорожных одежд, требуют корректировки. Долгие годы основным показателем, характеризующим несущую способность дорожной одежды, являлся упругий прогиб, регистрируемый на ее поверхности при статическом или динамическом нагружении, на основе которого определялся ее фактический общий модуль упругости. Также вводились более современные показатели для оценки фактического состояния дорожных одежд в виде амплитудно-частотных характеристик ускорения, регистрируемых на покрытии дорожной одежды при ударном нагружении. Однако эти показатели достаточно косвенно характеризуют одно из важнейших свойств работы дорожной конструкции – ее вязкоупругость, проявляющуюся при деформировании, и определяющую во многом процессы, как усталостного разрушения, так и накопления пластических деформаций [2, 5, 7-9, 11].

1. Экспериментальное оборудование для регистрации характеристик деформирования и плотности рассеиваемой энергии в дорожной одежде. Эффективным показателем, учитывающим проявление вязкоупругого деформирования, а также возникновение различных аномалий в структуре конструктивных слоев нежестких дорожных одежд является плотность рассеиваемой энергии, определяемая исходя из площади динамической петли гистерезиса [1, 3, 4, 6, 10, 17]. Известны работы, в которых объем рассеиваемой энергии определяется в ходе лабораторных испытаний и связывается в первую очередь с возникновением усталостных трещин в балочке из асфальтобетона [15, 18, 20]. Однако при проведении испытаний в полевых условиях и регистрации динамической петли гистерезиса на поверхности покрытия из асфальтобетона можно предположить, что абсолютные значения потока рассеиваемой энергии, связаны с общим накоплением повреждений в структуре дорожной одежды, включающим в себя как усталостные, так и иные виды пластических деформаций во всех конструктивных слоях дорожной одежды. Для обоснования этой гипотезы в рамках данных исследований был организован среднесрочный мониторинг состояния одного из участков автомобильной дороги М-4 «ДОН». В рамках мониторинга определялось изменение визуального состояния обследуемого участка, его прочности, и потока рассеиваемой энергии, определяемого исходя из площадей динамических

петель гистерезиса в координатах напряжение – деформация (σ-ε), регистрируемых с использованием установки ударного нагружения FWD (рис. 1).

а) *б)*

Рис. 1 Общий вид установки ударного нагружения *(а)*, петля гистрезиса, регистрируемая при ударном нагружении *(б)*

2. Технический мониторинг состояния тестового участка автомобильной дороги. Конструкция дорожной одежды на данном участке автомобильной дороги представлена пакетом слоев асфальтобетона общей толщиной 36 см, и слоя неукрепленного основания, толщиной 56 см из щебеночно-песчаной смеси С-4, устроенной на дополнительном слое основания из песка. Земляное полотно на данном участке отсыпано из суглинка тяжелого пылеватого с обеспеченным на всем протяжении модулем упругости упругости не менее 45 МПа.

Для обеспечения сопоставимости результатов мониторинга оценки состояния дорожной конструкции с использованием установки ударного нагружения FWD [16, 19, 21-23] проводилась в осенний период в конце октября. В аналогичные периоды года фиксировалось визуальное состояние обследованного участка. Непосредственно мониторинг технико-эксплуатационного состояния данного участка осуществлялся с 2014 по 2018 год.

Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Визуальная оценка состояния покрытия обследованного участка

Год эксплуатации	Вид дефектов	Средний балл
2014	Без дефектов	5,0
2015	Без дефектов	5,0
2016	Залитые поперечные одиночные трещины	4,9
2017	Залитые поперечные одиночные трещины	4,9
2018	Продольные центральные трещины; поперечные одиночные трещины (расстояние между трещинами 10-20 м)	4,5

Как показали результаты визуального обследования участка мониторинга первые дефекты покрытия начали проявляться на третий год его эксплуатации, в виде редких поперечных трещин, заливка которых осуществлялась в рамках содержания. Наиболее явно деструктивные процессы проявились на асфальтобетонном покрытии на 5-й год эксплуатации, в виде более частых продольных и поперечных трещин.

При проведении оценки прочности использовалась установка ударного нагружения FWD. Замеры осуществлялись в заранее зафиксированных 15 точках, закрепленных для обеспечения сопоставимости измерений, осуществляемых в ходе эксплуатации участка.

Результаты оценки прочности на обследованном участке представлены на рис. 2.

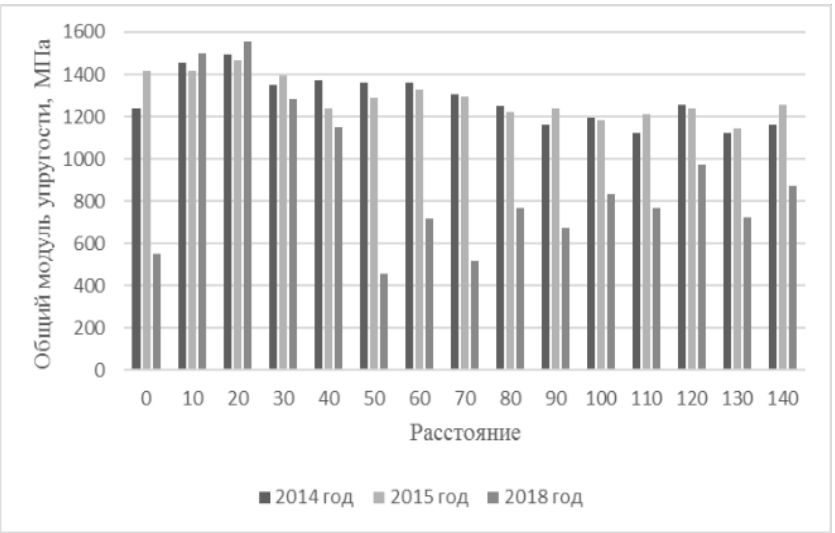


Рис. 2 Изменение общего модуля упругости дорожной одежды на участке мониторинга в процессе эксплуатации

Оценка общего модуля упругости дорожной одежды на обследованном участке показала, что в начале его эксплуатации (1-2 год) его фактическая несущая способность изменялась незначительно, частично даже превышая значения общих модулей упругости в начале эксплуатации участка, за счет процессов старения вяжущего в слоях асфальтобетона, доуплотнения слоев основания и грунта земляного полотна. Однако на 5 год эксплуатации данного участка отмечается резкое снижение общего модуля упругости дорожной одежды, что является причиной и в свою очередь подтверждается резкой интенсификацией процессов дефектообразования, установленной на покрытии дорожной одежды, при его визуальном обследовании.

Вместе с тем, как уже было отмечено выше более полную характеристику работы дорожной конструкции, учитывающую потери энергии в структуре дорожной конструкции, обусловленные проявлением вязкоупругих свойств ее слоев, а также наличием в них аномалий и разрушений, можно получить на основе анализа динамических петель гистерезиса, регистрируемых установкой FWD [12-14, 24, 25]. Отдельно нужно отметить, что при регистрации динамических петель гистерезиса установкой FWD, определяется только вертикальная составляющая плотности рассеиваемой энергии при ударной нагрузке. Полный объем рассеиваемой энергии в дорожной одежде на данный момент может быть рассчитан только на основе механико-математического моделирования движения расчетной нагрузки по поверхности покрытия. Тем не менее экспериментальный анализ значений плотности рассеиваемой энергии, при ударном нагружении, также важен, так как только в ходе экспериментального мониторинга состояния участка автомобильной дороги в реальных условиях эксплуатации возможно оценить зависимость данного показателя от разрушений и деформаций проявляющихся на покрытии дорожной одежды.

Результаты регистрации динамических петель гистерезиса, регистрируемых при ударном нагружении на покрытии дорожной одежды в 2014, 2015 и 2018 году, представлены на рис. 3, 4.

Форма петель динамического гистерезиса, регистрируемых на поверхности дорожной конструкции в течении первых двух лет эксплуатации, характеризуется однородностью, и примерно одинаковой площадью, составляющей 4,33 – 4,51 Дж/м^3. Анализ аналогичных результатов за 5-й год эксплуатации данного участка показывает их значительную неоднородность, выражающуюся как в изменении непосредственно траекторий нагрузки и разгрузки, при динамическом нагружении, так и общей площади динамических петель гистерезиса, изменяющейся в диапазоне 3,47-11,73 Дж/м^3. Результаты представлены в таблице 2.

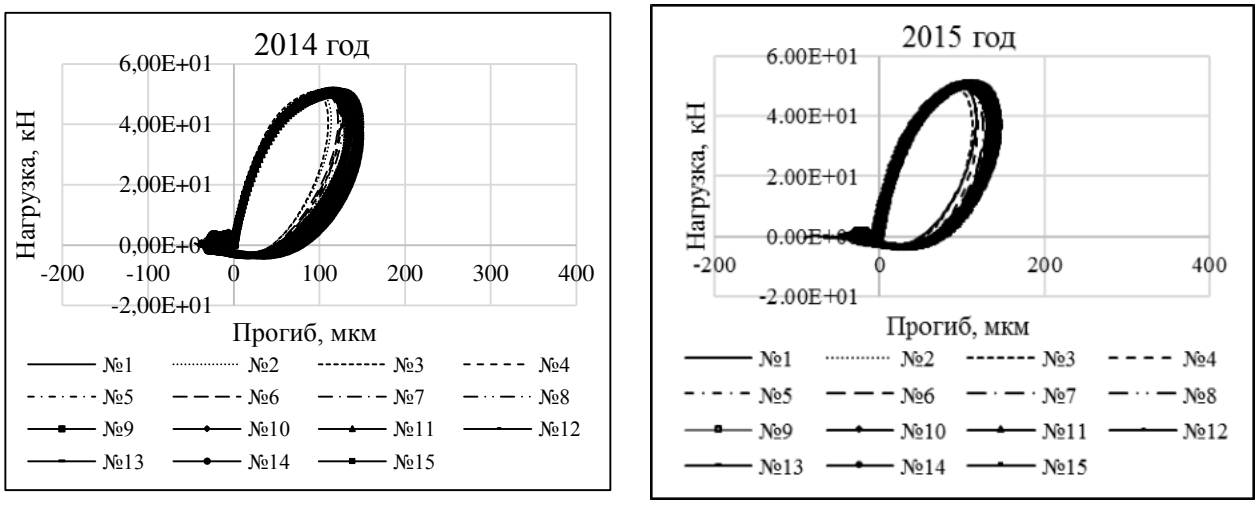


Рис. 3. Динамические петли гистерезиса, зарегистрированные на участке мониторинга в 2014 и 2015 году

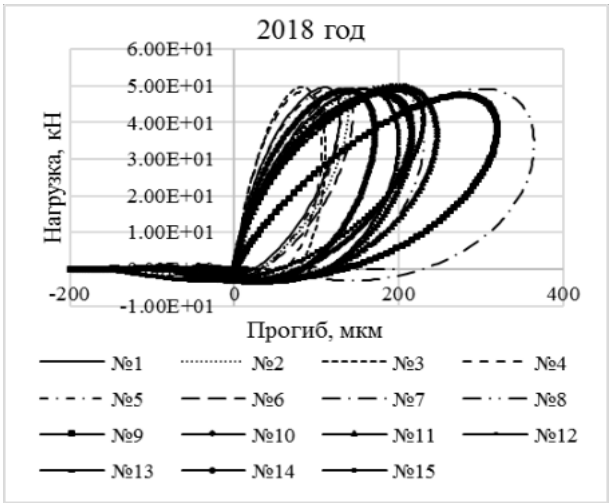


Рис. 4. Динамические петли гистерезиса, зарегистрированные на участке мониторинга в 2018 году

Таким образом комплексный анализ различных показателей, определяемых в ходе мониторинга технико-эксплуатационного состояния дорожной одежды на данном участке показывает, что плотность рассеиваемой энергии на поверхности дорожной одежды связана с ее эксплуатационным состоянием. Так ухудшение состояния дорожной одежды визуально проявляющееся в возникновении на ее поверхности продольных и поперечных трещин, приводит к увеличению плотности рассеиваемой энергии на поверхности дорожной конструкции, и соответственно уменьшению общего модуля упругости.

При этом показатель плотности рассеиваемой энергии может быть использован в задачах оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд, так как наиболее полно и точно характеризует проявления и изменения механизма вязкоупругого деформирования всей дорожной одежды и отдельных ее слоев, при динамическом нагружении.

Выводы

В ходе проведенных экспериментальных исследований впервые установлено, что плотность рассеиваемой энергии, определяемая исходя из площади динамической петли гистерезиса, регистрируемой при ударном нагружении, является эффективным индикатором отражающем его структурное состояние, учитывающем как снижение прочности дорожной

одежды в процессе эксплуатации, так и проявление дефектообразования как в структуре дорожной одежды, так и на ее поверхности.

Таблица 2

Плотность рассеиваемой энергии ударного нагружения, зарегистрированная в ходе мониторинга технико-эксплуатационного состояния участка автомобильной дороги

№ п/п	2014 год		2015 год		2018 год	
	Дж/м^3	Среднее значение	Дж/м^3	Среднее значение	Дж/м^3	Среднее значение
1	4,49	4,33	3,86	4,51	3,92	6,03
2	3,58		3,91		3,99	
3	3,56		3,78		3,89	
4	3,95		4,15		3,54	
5	4,01		4,43		3,50	
6	3,82		4,57		3,47	
7	3,84		4,49		11,73	
8	4,08		4,49		8,00	
9	4,44		4,69		8,66	
10	4,86		5,09		6,40	
11	4,23		4,97		8,07	
12	5,05		4,94		6,64	
13	4,54		4,69		6,89	
14	5,41		5,05		5,49	
15	5,23		4,52		6,31	

В ходе мониторинга технико-эксплуатационного состояния участка автомобильной дороги установлены темпы ухудшения эксплуатационного состояния по показателям среднего балла по визуальной оценке, общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды, и плотности рассеиваемой энергии, определяемой исходя из площади динамических петель гистерезиса, регистрируемых с использованием установки ударного нагружения FWD.

Установлено, что в течение первых двух лет эксплуатации на участке мониторинга отсутствовали видимые разрушения и деформации, что подтверждалось как визуальной оценкой, так и значениями динамического общего модуля упругости дорожной одежды. Наиболее интенсивное проявление дефектов характерно для 4-5 года эксплуатации, в виде продольных и поперечных трещин на покрытии. Значения общего модуля упругости, зарегистрированные на 5-й год эксплуатации, характеризуются значительным снижением, достигающим 30-50 % от значений общего модуля упругости на этапе ввода участка автомобильной дороги в эксплуатацию.

В течении первых двух лет эксплуатации форма и площадь динамических петель гистерезиса, зарегистрированных на поверхности покрытия характеризовалась однородностью, площадь при этом изменялась в диапазоне 4,33 – 4,51 Дж/м^3. Анализ аналогичных результатов на 5-й год эксплуатации данного участка показал их значительную неоднородность, выражающуюся как в изменении непосредственно траекторий нагрузки и разгрузки, при динамическом нагружении, так и общей площади динамических петель гистерезиса в диапазоне 3,47-11,73 Дж/м^3. Анализ результатов регистрации динамических петель гистерезиса, также показал увеличение плотности рассеиваемой энергии при ударном воздействии, связанное с проявлением разрушений и внутренних аномалий в конструктивных слоях дорожной одежды, что подтверждается результатами визуального мониторинга состояния покрытия дорожной одежды.

Практическая значимость проведенных исследований позволяет сделать вывод, что плотность рассеиваемой энергии, определяемая при динамическом воздействии на поверхность дорожной конструкции, может быть увязана с остаточным ресурсом дорожной одежды, и служить для прогнозирования момента наступления капитального ремонта и планирования ремонтно-восстановительных работ в течении жизненного цикла дорожной одежды.

Библиографический список

1. **Бондаренко, В.М.** Некоторые фундаментальные вопросы развития теории железобетона / В.М. Бондаренко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – № 2. – С. 5–14.

2. **Васильев, А.П.** Метод комплексной оценки качества и состояния автомобильных дорог / А.П. Васильев // Автомобильные дороги. – 1989. – № 7. – С. 10–11.

3. Модель повреждённой среды для оценки ресурсных характеристик конструкционных сталей при механизмах исчерпания, сочетающих усталость и ползучесть материала / И.А. Волков [и др.]// Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 2. – С. 232–245.

4. **Волков, И.А.** Численное моделирование накопления повреждений при сложном пластическом деформировании / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, № 1. – С. 5–18.

5. **Гребешок, К.С.** О необходимости совершенствования системы управления состоянием автомобильных дорог на основе реального остаточного ресурса / К. С. Гребешок // Транспортное строительство. – 2017. – № 1. – С. 23–25.

6. **Дьяков, И.Ф.** Прогнозирование ресурса деталей транспортных средств при циклическом нагружении / И.Ф. Дьяков // Грузовик. – 2013. – № 1. – С. 40–44.

7. **Красиков, О.А.** Мониторинг и стратегия ремонта автомобильных дорог / О.А. Красиков. – Алматы: КазгосИНТИ. – 2004. – 263 с.

8. **Красиков, О.А.** Система управления дорожными активами (на примере Республики Таджикистан) / О.А. Красиков // Дороги и мосты. – 2017. – № 37. – С. 39–66.

9. **Лазарев, Е.Г.** К вопросу управления состоянием нежестких дорожных одежд / Е.Г. Лазарев, Е.Е. Медрес, П.А. Петухов // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 3 (56). – С. 173–180.

10. **Матяш, Ю.И.** Физико-химические основы оценки остаточного ресурса узлов и деталей грузовых вагонов железнодорожного транспорта / Ю.И. Матяш, Ю.М. Сосновский, А.Г. Петракова // Известия Транссиба. – 2015. – №. 2 (22). – С. 12–18.

11. **Пархоменко, А.Ю.** Мониторинг состояния дорожной одежды, как фактор снижения загрязнения окружающей среды / А.Ю. Пархоменко, А.С. Минаков, И.В. Кияшко // Вестник ХНАДУ. – 2011. – Вып. 52. – С. 31–34.

12. **Тиратурян, А.Н.** Использование метода "обратного" расчета при эксплуатации автомобильных дорог / А.Н. Тиратурян, В.В. Мизонов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 25–27.

13. **Углова, Е.В.** Обзор инструментов управления состоянием дорожных конструкций / Е.В. Углова, С.С. Саенко // Интернет–журнал «Транспортные сооружения», Том 3, №1 (2016) http://t-s.today/PDF/02TS116.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

14. **Углова, Е.В.** Современный подход к оценке транспортно–эксплуатационных показателей автомобильных дорог Государственной компании «Российские автомобильные дороги» / Е.В. Углова, А.Н. Тиратурян, Л.Г. Шамраев // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2016. – № 1. – С. 36–51.

15. **Ameri, M.** Fatigue performance evaluation of modified asphalt binder using of dissipated energy approach / M. Ameri, M. Seif, M. Abbasi, M. Molayem, A. KhavandiKhiavi // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 136. – P. 184–191.

16. **Chatti, K.** Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use with Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for

Improvements to Falling Weight Deflectometers / K. Chatti, M. Emin Kutay, N. Lajnef, I. Zaabar, S. Varma, Hyung Suk Lee // Turner–Fairbank Highway Research Center, 2017. – March. – Report №. FHWA–HRT–15–063.

17. **Dharan, C.K.H.** A hysteresis-based damage parameter for notched composite laminates subjected to cyclic loading / C.K.H. Dharan, T.F. Tan // Journal of materials science. – 2007. – Vol. 42. – №. 6. – P. 2204–2207.

18. **Ji, J.** Application of the dissipated energy theory to estimate the fatigue characteristics of hot and warm recycled sma mixtures / J. Ji, Z. Suo, S. Yang, Y. Xu, S. Xu // International Symposium on Frontiers of Road and Airport Engineering, Shanghai, China, Oct. 26–28, 2015. – Shanghai, China. – P. 1–9.

19. **Lee, K.W.** Prediction of performance and evaluation of flexible pavement rehabilitation strategies / K.W. Lee, K. Wilson, S.A. Hassan // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2017. – Vol. 4, 6 2. – P. 178–184.

20. **Lei, D.** Fatigue life prediction method of concrete based on energy dissipation / D. Lei, P. Zhang, J. He, P. Bai, F. Zhu // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 145. – P. 419–425.

21. **Leiva-Villacorta, F.** Non-destructive evaluation of sustainable pavement technologies using artificial neural networks / F. Leiva-Villacorta, A. Vargas-Nordcbeck, D. H. Timm // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2017. – Vol. 10, Issue 2. – P. 139–147.

22. Application of Falling Weight Deflectometer for the Estimation of in-situ Shear Strength Parameters of Subgrade layer / H. Nabizadeh [et Al.]// Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. – 2017. – June, 28–30. – P. 743–749.

23. **Sarker, P.** Falling Weight Deflectometer Testing Based Mechanistic-Empirical Overlay Thickness Design Approach for Low-Volume Roads in Illinois / P. Sarker, E. Tutumluer // International Conference on Transportation and Development, Houston, Texas, June 26–29, 2016. – Houston, Texas. – P. 920–931.

24. **Tiraturyan, A.N.** Calculation of the Damping Factors of the Flexible Pavement Structure Courses According to the In-place Testing Data. / A.N. Tiraturyan, E.V. Uglova // Transportation Science and Technology: Proceedings of the 10th International Scientific Conference, TRANSBALTICA 2017; Vilnius Gediminas Technical University,Vilnius; Lithuania. – 2017. – Vol. 187. – P. 742–748.

25. **Tiraturyan, A.N.** Studying the energy distribution of the dynamic influences of road transport on the layers of nonrigid pavements / A.N. Tiraturyan, E.V. Uglova, A.A. Lyapin // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2017. – № 2. – P. 178–194.

УДК 519.6 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_100

А.Г. Ченцов, член-корреспондент РАН, **А.А. Ченцов,** канд. физ.-мат. наук, **А.Н. Сесекин**, д-р физ.-мат. наук, (Институт математики и механики имени Н.Н. Красовского, Уральский федеральный университет)

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ «НА УЗКИЕ МЕСТА» ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОСЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ПУНКТОВ ПРИ РЕСУРСТНОМ ОГРАНИЧЕНИИ НА КАЖДОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Аннотация. *Рассматриваются содержательные постановки задач маршрутизации, формализация которых приводит к обобщенной задаче коммивояжера на «узкие места». Типичным для таких задач является наличие так называемых «условий предшествования». Отмечается, что эффективным методом решения таких задач является модернизированный вариант метода динамического программирования. Приведен модельный пример.*

Substantial statements of routing problems are considered, the formalization of which leads to a generalized traveling salesman problem for "bottlenecks". Typical for such tasks is the

presence of so-called "precedence conditions". It is noted that an effective method of solving such problems is an upgraded version of the dynamic programming method. A model example is given.

Ключевые слова: задача на узкие места, динамическое программирование, маршрут, условия предшествования.
Key words: bottleneck problem, dynamic programming, route, precedence conditions.

1. Обсуждение задачи

В задаче о морских и авиационных перевозках нередко возникают условия предшествования (условия посещения одного пункта после другого). Это может быть связано с тем, что по мере движения объект управления (ОУ) «загружается» при посещении одних пунктов и «разгружается» в других пунктах. Нередко ОУ стеснен ограничениями ресурсного характера: условно можно считать ограниченным запас топлива на один «перелет» (в задачах об авиационных перевозках). В такой ситуации возникает вопрос о разрешимости исходной задачи о последовательных перемещениях (перелетах). В самом деле, пусть **d** из **R, d>=0,** есть упомянутое ограничение на ресурс при однократном перемещении из одного пункта в другой. Если окажется, что при какой-то очередности посещений возникнет этап с превышением данного значения **d** в смысле расходуемого ресурса, то данная очередность не допустима. Возникают вопросы, а имеется ли допустимая очередность и как ее найти? В докладе предлагается привлечь для решения данной проблемы задачу коммивояжера (ЗК) «на узкие места» [1] и аппарат динамического программирования, развивающий подход Р. Беллмана [2] для решения ЗК в аддитивной форме.

Содержательно, предлагаемый подход состоит в следующем. Мы отказываемся от ограничения **d** на ресурс одного перемещения и превращаем упомянутый ресурс в стоимость этого перемещения. После этого для каждой допустимой по предшествию очереди находим наибольшее значение ресурса на однократное перемещение. Данное наибольшее значение рассматриваем в качестве стоимости упомянутой очередности, однозначно определяемой соответствующей перестановкой индексов заданий. После этого рассматриваем задачу на минимум получающихся стоимостей – максимумов. Это и есть незамкнутая ЗК «на узкие места», для которой по методу ДП находим экстремум **V**, который сравниваем с **d**. Если **V=<d**, то наша исходная задача разрешима и следует найти оптимальную перестановку индексов заданий. Если же **V>d**, то исходная задача неразрешима; в этом случае необходимо изменять какие-то ее параметры. Например, использовать ОУ, у которого больше пополняемый, по мере посещения пунктов, запас ресурса (топлива). В случае **V=<d** для построения оптимальной очередности перемещений можно, в частности, задействовать аппарат ДП.

В связи с общими методами решения ЗК и задач типа ЗК отметим монографии [3-5], в связи с применением ДП для решения ЗК см. [2,6]. Из других методов решения ЗК сейчас отметим только метод ветвей и границ [7].

В настоящей работе мы следуем подходу [8, гл. 3] и рассматриваем несколько более общую постановку (впрочем, в [8, гл. 2] приведена конструкция на основе ДП, ориентированная на саму ЗК «на узкие места»). В рамках данной общей постановки объектами посещения являются не отдельные пункты, а мегаполисы, определяемые как непустые конечные множества. Это позволяет учитывать возможную многовариантность перемещений. Мы будем полагать, что посещение каждого мегаполиса сопровождается, вообще говоря, выполнением некоторых работ, именуемых далее внутренними в отличие от внешних перемещений между мегаполисами. Будем исходить из идеи упорядочивания конечной системы циклов, каждый из которых включает этап внешнего перемещения и этап выполнения внутренних работ. Условия предшествования являются ограничениями на систему внешних перемещений, как и в случае ЗК (в англоязычной литературе: TSP-PC). Возникающий маршрутный процесс включает точку старта, собственно маршрут (т.е. перестановку индексов) и траекторию или трассу перемещений по мегаполисам, занумерованным в соответствии с маршрутом. Каждому маршрутному процессу сопоставляется показатель

качества в виде наибольшего из значений, оценивающих затраты на отдельных циклах. Требуется минимизировать упомянутый «совокупный» показатель. Ближайшая цель состоит в сравнении **V** и **d**; при **V=<d** требуется найти оптимальный (в смысле реализации **V**) маршрутный процесс.

2. Метод решения

Вышеупомянутая неаддитивная задача маршрутизации представляется очень сложной как с качественной, так и с вычислительной сторон. Для поиска ее оптимального решения применялся нестандартный вариант метода ДП, что потребовало серьезной формализации, для ознакомления с которой мы отсылаем к [8]. В настоящей работе обсудим моменты идейного характера. Прежде всего отметим, что применение ДП в условиях предшествования потребовало построение специального расширения исходной задачи. При этом система частичных задач была получена с использованием редукции ограничений: допустимость по предшествованию была «заменена» допустимостью в смысле вычеркивания (заданий из списка); см. [9, часть 2]. При этом оказалось, что для полной задачи запас допустимых маршрутов при упомянутой редукции не изменился (см. [9, теорема 2.2.1]). Это позволяет в частичных задачах, составляющих расширение исходной, применять более удобный вариант условий, связанный с процедурой вычеркивания.

Следующий этап исследования связан с выводом уравнения Беллмана (см. [8, раздел 3.3.1]) в условиях построенного упомянутым способом расширения основной задачи (см. [8, раздел 3.3]). Это уравнение определяет эволюцию экстремумов частичных задач.

Для практической реализации процедуры ДП активно использовались условия предшествования. Построение всего массива значений функции Беллмана было заменено построением некоторых специальных ее слоев, не исчерпывающих в совокупности всего массива; данное построение проведено в [8, раздел 3.4]. Используется рекуррентная процедура. [8, предложение 3.4.2] при нулевой начальной функции (функции начального слоя). Финалом рекуррентной процедуры является зависимость экстремума полной задачи от точки старта.

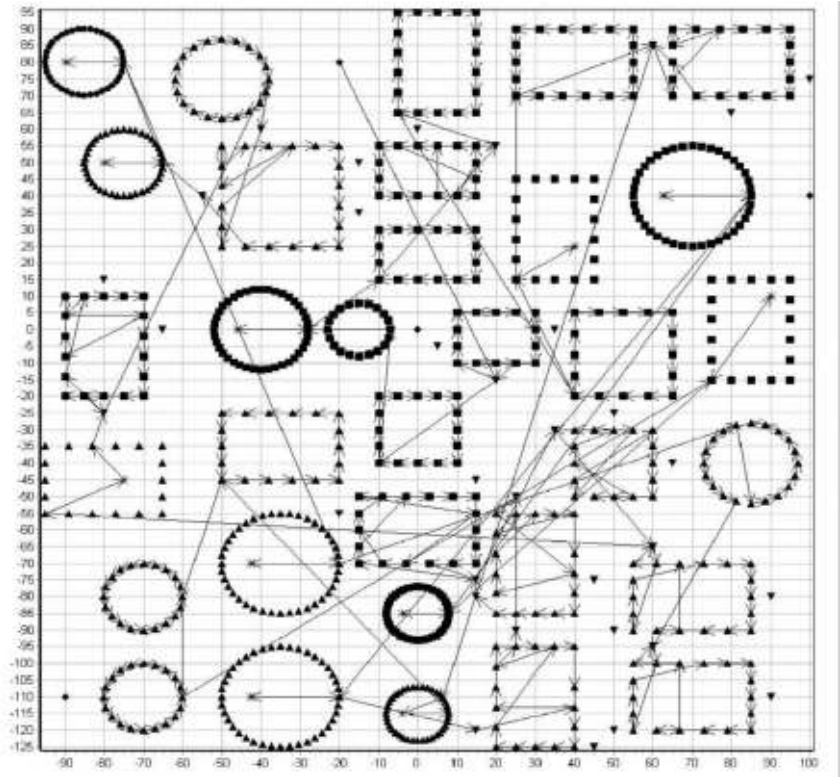


Рис. 1. Оптимальные маршруты и трасса

В случае, когда требуется только проверить разрешимость исходной задачи, остается проминимизировать эту зависимость; ее экстремум совпадает с **V** и мы можем осуществить его сравнение с **d.** Если же требуется построить оптимальный маршрутный процесс, то в памяти компьютера следует сохранить все слои функции Беллмана; после их построения и нахождения оптимальной точки старта следует организовать процедуру построения оптимальной (для данной стартовой точки) пары маршрут-траектория, следуя [8, раздел 3.5]. Дополняя данную пару (оптимальной) точкой старта, мы получаем глобально оптимальный маршрутный процесс.

На основе вышеупомянутых теоретических конструкций был построен оптимальный алгоритм, реализованный на ПЭВМ. В настоящей работе приведен пример решения модельной задачи на плоскости по методу ДП. Рассматривались мегаполисы, к каждому из которых «привязана» точка, в которой требуется побывать и выполнить некоторую работу, связанную с данным посещением. При этом выделены пункты (города мегаполиса), в которые можно прибыть и из которых можно отправляться. Функции стоимости определяются в виде расстояний. Рассматриваются 33 мегаполиса и 33 адресных пары, определяющие количество условий предшествования. Множество возможных точек старта представлено следующими четырьмя точками: (-20,80); (-90,-110); (0,0); (100,40). Внутренние работы сводятся к посещению «проверяемой» точки с целью выполнения некоторого действия. Получено оптимальное значение задачи (экстремум), равный 214,519, выбрана стартовая точка (-20,80). Время вычисления составило 25 часов, 44 минуты, 20 секунд. Оптимальные маршрут и трасса показаны на рис. 1.

В связи с задачами такого типа см. [10].

3. Возможные применения

Представляется, что вышеупомянутый подход гипотетически может найти применение в вопросе о транспортировке грузов средствами малой авиации с посещением системы аэродромов, на которых осуществляется погрузка-выгрузка и заправка топливом. Возможно объединение нескольких аэродромов в кластер – появление мегаполиса, если речь идет об обслуживании достаточно большого района с развитой сетью автомобильных дорог. Можно полагать, что размерность совокупной задачи (количество мегаполисов или «одиночных» аэродромов) здесь не превышает 30, а это позволяет находить экстремум маршрутной задачи и оптимальный маршрутный процесс на основе конструкций [8, гл. 3] с использованием ПЭВМ; оптимизация точки старта, как правило, не требуется, а вот учет условий предшествования в задачах, связанных с грузоперевозками, представляется важным.

Второе важное направление в задачах, связанных с малой авиацией, может состоять в выборе районов размещения аэродромов для последующего использования самолетами с заданными ограничениями на запас топлива. В этой части интерес представляет, на наш взгляд, вопрос о размещении мегаполисов и, в простейшем случае, пунктов, для которых будет существовать маршрутный процесс, удовлетворяющий условиям осуществления грузоперевозок с последовательным прибытием в заданные пункты следования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-01-00573.

Библиографический список

1. **Сергеев, С.И.** Алгоритмы решения минимаксной задачи коммивояжера. I. Подход на основе динамического программирования [Текст] / С.И. Сергеев // Автоматика и телемеханика. - 1995. - № 7. - С. 144-150.

2. **Беллман, Р.** Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере [Текст] / Р. Беллман // Кибернетический сборник. М.: Мир, 1964. Т.9. С. 219-228.

3. **Gutin, G.** The Traveling Salesman problem and its variations. [Текст] / G. Gutin, A.P. Punnen // Berlin: Springer, 2002. - 850 p.

4. **Cook, W.J.** In Pursuit of the Traveling Salesman: Mathematics at the Limits of Computation. [Текст] / W.J. Cook // Princeton University Press, 2012. - 228~p.

5. **Гимади, Э.Х.** Экстремальные задачи на множествах перестановок. [Текст] / Э.Х. Гимади, М.Ю. Хачай // Екатеринбург: УМЦ УПИ. 2016. - 216 с.

6. **Хелд, М.** Применение динамического программирования к задачам упорядочения [Текст] / М. Хелд, Р.М. Карп. // Кибернетический сборник. М.: Мир. 1964. Т. 9. - С. 202-218.

7. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере [Текст] / Дж. Литл [и др.] // Экономика и математические методы. 1965. Т.1 (Вып. 1) - С. 94-107.

8. **Ченцов, А.Г.** Задачи маршрутизации перемещений с неаддитивным агрегированием затрат. [Текст] / А.Г. Ченцов, А.А. Ченцов, А.Н. Сесекин // М.: URSS. 2020. - 232 с.

9. **Ченцов, А.Г.** Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. [Текст] / А.Г. Ченцов // М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. - 238 с.

10. **Ченцов, А.Г.** Об одной задаче маршрутизации с неаддитивным агрегированием затрат [Текст] / А.Г. Ченцов, А.А. Ченцов, А.Н. Сесекин. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Т.13, № 1. - С. 64-80.

УДК 621.313.13 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_104

С.С. Черняев, В.В. Сироткин (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА С БЛАГОПРИЯТНЫМИ ВЕТРОВЫМИ УСЛОВИЯМИ

Аннотация. *В статье проведено технико-экономическое обоснование внедрения ветроэнергетической установки (ВЭУ) в систему тягового электроснабжения постоянного тока. В процессе исследования отобраны наиболее перспективные районы с благоприятными ветровыми условиями, для которых определены многолетние среднегодовые скорости ветра. Исходя из принятых параметров проектируемой ВЭУ горизонтальной конструкции, определены диаметры лопастей, вырабатываемая мощность ветрового потока и генератора. Рассчитаны дифференциальные повторяемости скорости ветра с помощью математического распределения по Вейбуллу. Проведен экономический расчет, по результатам которого определены сроки окупаемости и суммарный экономический эффект от интеграции ВЭУ.*

The paper deals with the technical and economic study of a wind power plant in railway DC power supply. In the course of investigation the target areas with favorable conditions were selected. The long-term annual wind speeds were determined for these regions before. Differential recurrences of wind speed are calculated using the Weibull mathematical distribution. An economic calculation was carried out, according to the results of which the payback periods and the total economic effect from the integration of wind turbines were determined.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, ветроэнергетическая установка, дифференциальная повторяемость, среднегодовая скорость ветра.

Keywords: traction power supply system, wind power plant, differential frequency, average annual wind speed.

Введение

Железнодорожный транспорт является важнейшим звеном в системе перевозочного процесса в России. Сегодня железнодорожная отрасль ставит перед нами задачи, связанные с комфортабельностью и безопасностью движения, модернизацией опытного и созданием нового самоходного и тягового подвижного состава, внедрением новых передовых технологий рационального использования энергоресурсов, а также задачи, связанные с оптимизацией мер организационного характера, направленных на сохранение энергоресурсов [1].

На железнодорожных дорогах России ежегодно растет объем перевозок и повышаются скорости движения, в связи с чем возрастает нагрузка на тяговую энергосистему. Вследствие этого возникает перерасход электроэнергии и снижение пропускной способности, что может привести к негативным последствиям. Данные проблемы особо остро возникают на участках железной дороги, электрифицированных по системе постоянного тока. Из истории эксплуатации на Московской железной дороге на участке Рыбное–Перово ток двух электровозов ВЛ10 с поездом массой 10 158 т достигал 3,5–4,5 кА, а напряжение в контактной сети опускалось до 2,6 кВ, что согласно ПТЭ не допустимо [2, 3]. Исходя из сказанного выше, одним из перспективных и актуальных направлений является повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения (СТЭ) постоянного тока путем внедрения ветроэнергетической установки (ВЭУ). Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) более экологичны по сравнению с традиционными источниками энергии. Важнейшую часть в ВИЭ занимает ветроэнергетика. Внедрение ВЭУ в СТЭ может решить проблемы энергетической эффективности. В России существуют достаточно протяженные участки на постоянном токе, которые пролегают через районы с благоприятными условиями для использования ВЭУ. Согласно данным за 2019 год ветроэнергетический потенциал в России составляет 16,5 тыс. ТВтч/год [4, 5].

На рис. 1 приведена карта среднегодовой скорости ветра, измеряемой в России на протяжении многих лет.

Рис. 1. Среднегодовые скорости ветра в России

Подробно проанализированы участки железной дороги на постоянном токе, где наблюдаются благоприятные среднегодовые скорости ветра для перспективного использования в ветроэнергетике (табл. 1).

Общеизвестно, что об окупаемости и экономической эффективности применения ВЭУ следует утверждать, если среднегодовая скорость ветра превышает 3 м/с. Обоснование

параметров ВЭУ, ее размеров, типа, возможного количества электроэнергии производится на основе технико-экономических расчетов и инженерного проектирования с учетом требований потребителя, связи с энергосистемой, количества потребляемой электроэнергии, затрат на оплату этой энергии, а также местоположения объекта энергоснабжения и природно-климатических характеристик в этом районе.

Таблица 1

Электрифицированные участки дорог постоянного тока, где наблюдаются благоприятные среднегодовые скорости ветра для использования в ветроэнергетике, измеренные на высоте 10 м

Регионы	Диапазон среднегодовой скорости ветра, м/с	Регионы	Диапазон среднегодовой скорости ветра, м/с
Челябинская область	3,7–4,8	Рязанская область	4,3–5
Омская область	3,7–4,2	Самарская область	4,1–4,7
Республика Крым	4,6–5,5	Краснодарский край	3,4–4,3

Проведенные ранее исследования показали [6], что генерируемая мощность ВЭУ для компенсации потерь на тягу поездов на однопутном участке должна составлять не менее 800 кВт (что соизмеримо с мощностью тяговой электрической машины электровоза) при учете следующих факторов: 1) запас на постоянно увеличивающиеся объемы перевозок, 2) погрешность на расчеты и 3) резерв на аккумулирование (в случае ветрового затишья).

Технико-экономический расчет ВЭУ

Для проведения расчетов рассматривается ВЭУ горизонтально-осевой конструкции в местах, где располагаются участки СТЭ постоянного тока с благоприятными ветровыми условиями. Изучены среднегодовые скорости ветра, измеренные на высоте 100 метров на исследуемых участках (табл. 2) [7].

Таблица 2

Среднегодовые скорости ветра, измеренные на высоте 100 метров, где пролегают электрифицированные железнодорожные пути постоянного тока

Многолетние среднегодовые скорости ветра, измеренные на высоте 100 м, м/с	Географическое положение				
	Краснодарский край	Челябинская область	Самарская область	Омская область	Рязанская область
	5,8	6	6,5	5,9	6,3

Первоначально необходимо определить диаметр ротора турбины ВЭУ по следующей формуле (1):

$$D = \sqrt{\frac{8 \cdot N_{\text{ВЭУ}}}{C_{\text{р}} \cdot \rho \cdot \left(k_{\text{п}} \cdot v_{\text{ср}}\right)^3 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{эл.}} \cdot \eta_{\text{мех.}}}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ВЭУ}}$ – мощность проектируемой ВЭУ, кВт;

$C_{\text{р}}$ – коэффициент использования мощности ветра (КИМВ);

ρ – плотность воздуха, кг/м^3;

$k_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий разницу высот;

$v_{\text{ср}}$ – среднегодовая скорость ветра, м/с;

$\eta_{\text{эл.}}$ – коэффициент полезного действия электрической части;

$\eta_{\text{мех.}}$ – коэффициент полезного действия трансмиссии.

Одним из важнейших параметров в ветроэнергетике является коэффициент использования мощности ветра КИМВ $\left(C_{\text{р}}\right)$. Данный коэффициент зависит от типа генераторной установки, аэродинамических характеристик лопастей. Лучшие показатели $C_{\text{р}}$ составляют от 0,4 до 0,5.

Для ВЭУ большой мощности требуется значительная аэродинамическая энергия набегающего потока ветра, вырабатываемая ветроколесом. Для создания этой энергии требуется значительная площадь, охватываемая лопастями. В связи с этим фактором возрастает высота ВЭУ, которую предварительно требуется учесть в расчетах.

Так как скорость ветра на разных высотах различается, требуется определить скорость ветра на установленной высоте (2):

$$k_{\text{n}} = \left(\frac{h_{\text{оси}}}{h_{\text{изм.}}}\right)^{m}, \text{ м/с}, \tag{2}$$

где $h_{\text{оси}}$ – расчетная высота ВЭУ, м;

$h_{\text{изм.}}$ – высота, на которой производились измерения скорости ветра, м;

m – коэффициент высотности.

Расчет мощности ветрового потока и предполагаемой мощности, вырабатываемой ВЭУ, вычисляется по следующим формулам (3, 4):

$$N_{\text{вет. пот.}} = 0{,}5 \cdot \rho \cdot \left(k_{\text{n}} \cdot v_{\text{ср}}\right)^{3} \cdot \frac{\pi \cdot D^{2}}{4}, \text{ кВт}, \tag{3}$$

$$N_{\text{ВЭУ}} = 0{,}5 \cdot \rho \cdot \left(k_{\text{n}} \cdot v_{\text{ср}}\right)^{3} \cdot \eta_{\text{эл.}} \cdot \eta_{\text{мех.}} \cdot \frac{\pi \cdot D^{2}}{4}, \text{ кВт}. \tag{4}$$

Предварительно была принята минимальная скорость ветра, при которой включается ВЭУ, – 2 м/с, а максимальная скорость − 20 м/с. Как правило, частота повторяемости скорости ветра выше 20 м/с возникает достаточно редко и является опасной скоростью для ВЭУ.

По результатам расчетов на рис. 2 представлены графики вырабатываемой мощности ветрового потока и предварительной вырабатываемой мощности ВЭУ по экспоненциальному закону, ограниченной мощностью электрической машины.

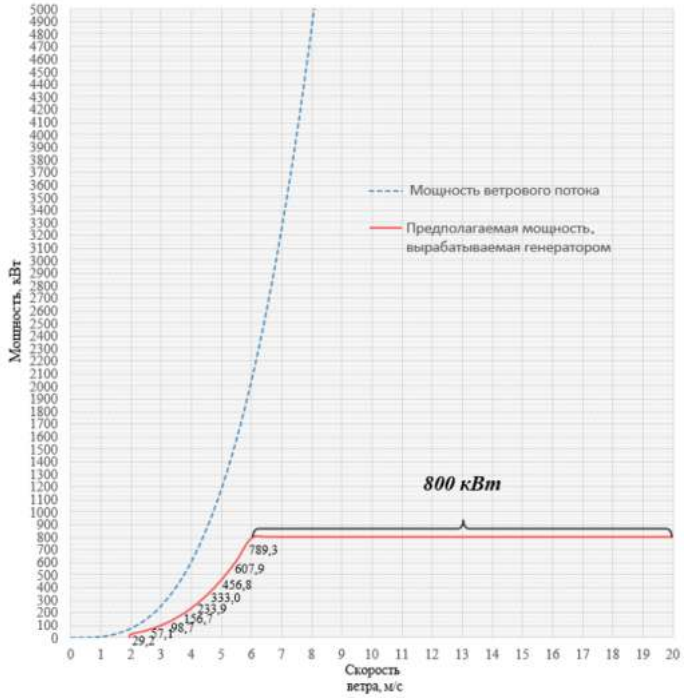


Рис. 2. Графики зависимости мощности ветрового потока и предполагаемой мощности ВЭУ от скорости ветра

При скорости ветра 6 м/с мощность ветрового потока составит около 800 кВт. При скоростях ветра свыше 6 м/с мощность ветрового потока будет искусственно ограничена реальными характеристиками генератора установки. Стоит отметить, что характер вырабатываемой мощности генератора может немного отличаться, так как его характеристики выявляются уже при проектировании самой электрической машины. На данном этапе мощностная характеристика найдена для проведения ориентировочных технико-экономических расчетов. В дальнейшем характеристики проектируемой электрической машины будут уточняться.

Выработка электроэнергии ВЭУ в год определяется по формуле (5):

$$Э_{\text{ВЭУ}} = 0{,}01 \cdot T \sum_{\text{i}=v_{\text{вкл.}}}^{v_{\text{откл.}}} P_{\text{ВЭУi}} \cdot (v) \cdot f_{\text{i}}(v), \ \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}, \tag{5}$$

где $P_{\text{ВЭУi}} \cdot (v)$ – зависимость полезной мощности ВЭУ от скорости ветра на высоте оси ветроколеса при i, меняющемся в диапазоне от скорости включения $v_{\text{вкл.}}$ до скорости отключения $v_{\text{откл.}}$ с интервалом 1 м/с, кВт · ч;

$f_{\text{i}}(v)$ – дифференциальная повторяемость скорости ветра, %;

T – количество часов в году, ч.

Важной характеристикой ветроэнергетических ресурсов территории является повторяемость различных градаций скорости ветра, которая показывает, какую часть времени наблюдается то или иное значение скорости ветра. В последнее время широко используют двухпараметрическое распределение Вейбулла, которое дает достаточную сходимость с результатами опытных наблюдений [8].

Дифференциальная повторяемость скорости ветра по Вейбуллу описывается выражением (6):

$$f(v) = \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma}\right], \ \%, \tag{6}$$

где v – градация скорости ветра, м/с;

γ – параметр формы кривой распределения;

β – параметр масштаба, численно близкий к величине среднего значения скорости ветра.

Параметр γ можно определить по справочным данным [8]. Масштабный параметр скорости β зависит от высоты, среднегодовой скорости ветра, степени открытости местности и параметра формы кривой γ. Его можно определить по формуле (7):

$$\beta = \frac{k_{\text{h}} \cdot v}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}, \tag{7}$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Дифференциальные повторяемости скорости ветра на высоте 130 метров для исследуемых районов вычислялись в диапазоне от 0 до 20 м/с (интервал – 1 м/с). Изменение скорости определялось как среднеарифметическое значение на каждом интервале.

Для проведения дальнейших технико-экономических расчетов следует определить капитальные затраты на установку одной ВЭУ $(И_{\text{ВЭУ}}$, руб$)$. Необходимо отметить, что в капиталовложения входят стоимости самой ветроустановки, изготовленной на заводе, башни, закладки фундамента, проектных и строительных работ, транспортировки и др. Информация о ценах у заводов-изготовителей ВЭУ различных конструкций труднодоступна и в ряде стран варьируется. Отечественные производители ВЭУ такие величины мощности пока не

производят. Поэтому удобно определить ориентировочную цену ВЭУ по ее удельной стоимости [9–11].

Согласно данным [10] перспективы состояния удельной стоимости ВЭУ по расчетному сценарию к 2030 году находятся на уровне $Ц_{ВЭУ} = 1300$ евро/кВт · ч. В расчетах перевод евро в рубли производился по действующему курсу.

Капитальные затраты ВЭУ определяются по формуле (8):

$$P = Ц_{ВЭУ} \cdot N_{ВЭУ}, \text{ руб.} \tag{8}$$

Предварительный срок окупаемости ВЭУ вычисляется по формуле (9):

$$t_{ок} = \frac{Ц_{ВЭУ} \cdot N_{ВЭУ}}{Э \cdot C_{т} - И_{изд.}}, \text{ лет,} \tag{9}$$

где $C_{т}$ – тариф на электроэнергию, $\frac{\text{руб.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$;

$И_{изд.}$ – ежегодные издержки эксплуатации, руб.

Себестоимость вырабатываемой энергии за год находится по формуле (10):

$$C = \frac{P + И_{изд.} \cdot t_{сс}}{Э \cdot t_{сс}}, \ \frac{\text{руб.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \tag{10}$$

где $t_{сс}$ – срок службы ВЭУ, лет.

Общий экономический эффект от внедрения ВЭУ определяется по формуле (11):

$$П = (t_{сс} - t_{ок}) \cdot (Э \cdot C_{т} - И_{изд.}), \text{ млн. руб.} \tag{11}$$

Результаты технико-экономических расчетов для исследуемых регионов сведены в табл. 3.

Выводы

Установка ВЭУ для подпитки контактной железнодорожной сети актуальна и экономически целесообразна в местах с благоприятными ветровыми условиями на «трудных» профилях пути.

Таблица 3

Результаты технико-экономических расчетов

Показатели	Регионы				
	Омская область	Краснодарский край	Челябинская область	Рязанская область	Самарская область
1. Диаметр ветроколеса, м	138	142	135	125	120
2. Выработка электроэнергии ВЭУ, $\cdot 10^6$ $\frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}$	3,92	3,1	4	4,24	3,6
3. Срок окупаемости, лет	6,05	8,31	5,9	5,47	6,6
4. Себестоимость электроэнергии, $\frac{\text{руб.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	1,55	1,96	1,52	1,43	1,69
5. Экономический эффект, млн. руб.	288,4	190	298	326,7	251,8

Сегодня в развитых странах мира наблюдается интенсивный прирост мощности альтернативной энергетики. Немаловажными факторами ее опережающего развития в различных странах, независимо от географического положения, экономического состояния и ресурсной базы энергетики, являются экологические преимущества этих источников, а также постоянно развивающиеся технологии повышения экологической безопасности возобновляемых источников энергии.

Во многих странах происходит выравнивание стоимости энергии традиционных источников и возобновляемых, прежде всего в связи с ужесточением экологических требований и повышением стоимости энергии традиционных электростанций (особенно ТЭЦ). При этом стоимость оборудования для производства возобновляемой энергии непрерывно снижается за счет технологического совершенствования.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (дата обращения 04.11.2021).

2. **Аржанников, Б. А.** Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов: монография / Б.А. Аржанников // – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012. – 207 с.

3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (редакция от 25.12.2018) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tdesant.ru/info/item/57 (дата обращения 07.11.2021).

4. Ветроэнергетический рынок России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rawi.ru/wp-content/uploads/2019/04/vetroenergeticheskiy-ryinok-rossii-2018-19_bravi.pdf (дата обращения 08.11.2021).

5. Сайт «ГИС ВИЭ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gisre.ru/sitemap (дата обращения 09.11.2021).

6. Определение мощности ветроэнергетической станции при ее работе в системе тягового электроснабжения постоянного тока / С.С. Черняев [и др.] // Труды РГУПС. – 2021. – № 3 (56). – С. 55–61.

7. **Харитонов, В.П.** Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов // М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

8. **Безруких, П.П.** О стоимостных показателях энергетических установок на базе возобновляемых источников энергии / П.П. Безруких // Энергетическая политика. – 2009. – № 5. – С. 5–11.

9. **Безруких, П.П.** Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / П. П. Безруких, П.П. Безруких (мл.), С. В. Грибков; Под ред. П. П. Безруких – М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнеогетик», 2014. – 304 с.

10. **Петрушин, А.Д.** Повышение энергетической эффективности подвижного состава железных дорог с учетом требований экологии / А.Д. Петрушин, И.В. Волков, С.С. Черняев // Вестник РГУПС. − 2021. − № 1 (81). − С. 40−46.

11. **Черняев, С.С.** Обзор конструкций ветроэнергетических установок большой мощности в мировой практике в качестве альтернативного источника энергии на железнодорожном транспорте / С.С. Черняев, Д.А. Пигалев, В.В. Сироткин // Труды РГУПС. – 2019. – № 4 (49). – С. 114–119.

СЕКЦИЯ 2.
Механика транспортных систем

УДК 531.43 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_111

А.В. Бородай, канд. техн. наук, **Е.В. Скринников,** канд. техн. наук, (Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова)

О ТРЕНИИ ТЕЛ КАК ФАКТОРЕ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. *На основе развития волновых представлений о процессах трения и макроскопического движения предложена общая схема действия внутренних тангенциальных движущих сил в трибосистемах, являющегося результатом подвода в систему энергии внешней среды и элементом процесса самоорганизации.*

On the base of the development of the wave conception of friction and macroscopic motion, the universal scheme of action of driving (motive) forces in tribosystems, which are the result of external medium power supply and the element of self-organization, is presented.

Ключевые слова: поперечный волновой процесс, поверхностные пленки, поверхностные стержневые системы, тепловой эффект трения.
Keywords: transverse wave, surface films, surface rod systems, friction heat effect.

Результаты анализа данных свидетельствуют, что трение тел, оказывая сопротивление движению, одновременно с этим обеспечивает действие на тела и системы тангенциальных движущих сил и тем самым является важным фактором указанного движения [1]. Из работы [2] следует, что схема трибосистемы и схема действия в ней сил и скоростей движения может быть представлена в виде некоторой замкнутой поперечной волны (рис. 1).

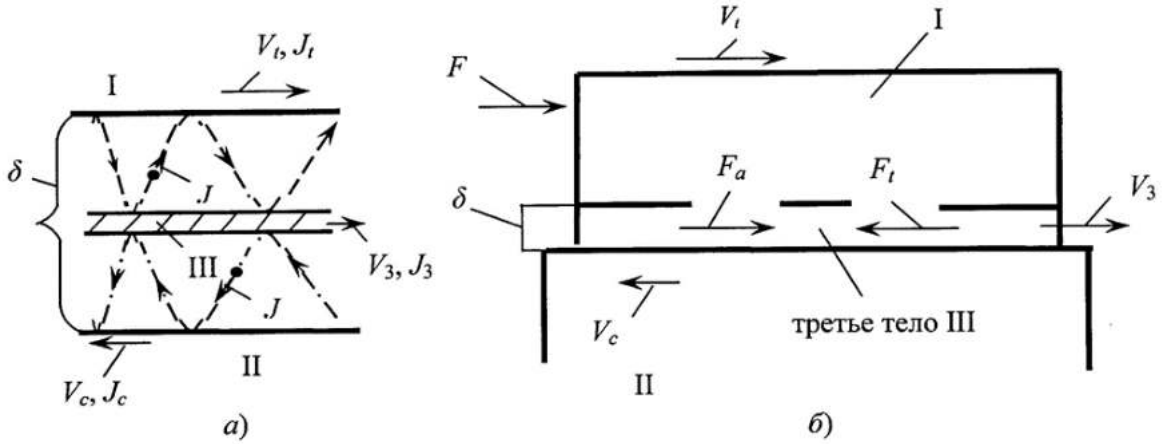


Рис. 1. Схема функционирования поверхностного слоя δ (а) и действия тангенциальных сил в системе (б); *I* – тело, *II* – контртело; V_t, V_c, V_3 – скорости, J_t, J_c, J_3 – количества тангенциального движения тела, контртела и третьего тела

Можно видеть, что в системе, наряду с действием внешних движущих сил F, присутствуют внутренние, контактные движущие силы F_a. Являясь принципиально наиболее важными, силы F_a не могут действовать самостоятельно, в отрыве от сил F. И тем самым силы F_a в значительной степени являются обусловленными действием внешних сил, которые следует рассматривать в качестве определяющего фактора взаимодействия и направленного движения. Настоящая работа посвящена в основном раскрытию и описанию механизма действия внутренних движущих сил на основе развития представлений о волновой природе трения.

В соответствии со схемами, приведенными на рис. 2, 3, основу строения и кинетики

трибосистемы составляет фрикционная связь (совокупность связей), основными элементами которых являются: суммарные вихри *a*, *b*, *c*; третье тело III (излучатель волнового трибоимпульса *J*), а также активная *p* и пассивная *r* стержневые ветви, представляющие собой некоторые вихревые цепи. Возникновение и структура цепей обусловлены универсальным вихревым строением и кинетикой сред, тел и физических объектов. Присутствие ветви *p* вызывает действие движущей силы F_a, а ветви *r* – силы трения F_t, препятствующей движению тел [2]. Одними из основных эффектов действия связей являются продольное сжатие ветвей с образованием складок *d*, деформация и перемещение центров масс слоев и взаимодействующих тел Δ_h. Процесс происходит в полях потенциальных сил $F_п$ и адгезионных сил F_{ad} нормально поверхности, обеспечивая присутствие составляющей суммарного потенциала системы (трибопотенциала φ и φ_Σ):

$$\varphi_\Sigma (\varphi) = (F_{ad} + F_п)\, \Delta_h / m_j,$$

где m_j – масса носителя трибоимпульса.

Активная и пассивная ветви связи имеют *S*-образную конфигурацию, симметричны относительно вертикальной оси и располагаются в смежных параллельных плоскостях, ориентированных нормально поверхности трения в направлении возможного движения взаимодействующих тел. Ветвь *p* является падающей, а ветвь *r* – отраженной полуволной, составляющими в сумме замкнутую (стоячую) поперечную волну в поверхностном слое – физическую основу процесса взаимодействий [2].

Стержневые системы образуют противоборствующие пары активной *p* и пассивной *r* ветвей, являющихся проводниками излучаемого *J* и отраженного потоков J_x носителей волнового импульса (рис. 2, 3). Ветви связи одновременно являются проводниками потоков массопереноса (вторичных потоков) вследствие наличия разреженных скин-слоев *S*, образуемых *Z*-пленками, окружающими стержни. Это потоки J''_x, генерируемые подслоем тел и распространяющиеся в направлении третьего тела, а также вторичные потоки продуктов трибодеструкции J''_l, генерируемые третьим телом и распространяющиеся в направлении подслоя тел.

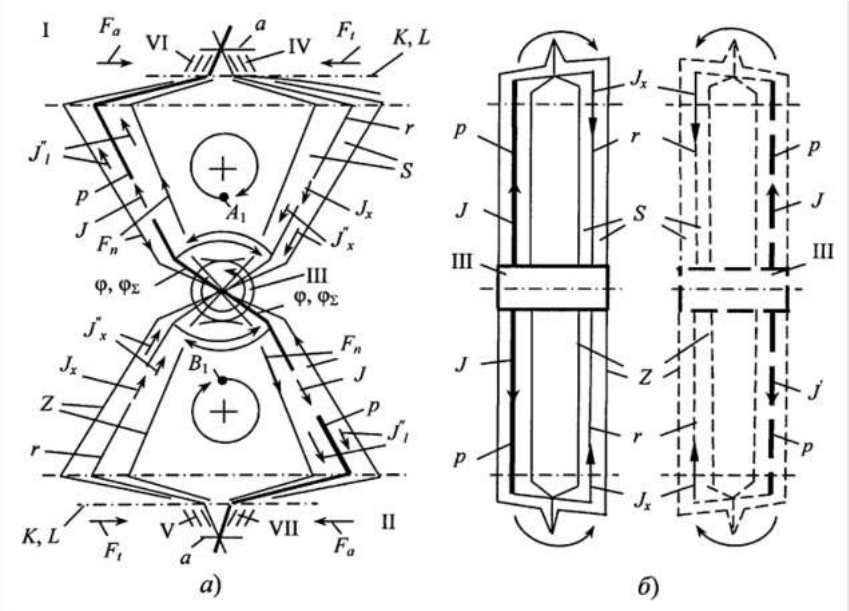


Рис. 2. Схема строения и функционирования симметричной адгезионной фрикционной связи (состояние статического равновесия системы); *а* – продольное, *б* – поперечное сечение; A_1, B_1 – центры масс системы

Соответственно структура связи характеризуется наличием зон подвода ресурса (энергии и массы) среды в систему (зоны IV и V) и зон поглощения потоков продуктов деструкции подслоем тел (зоны VI и VII).

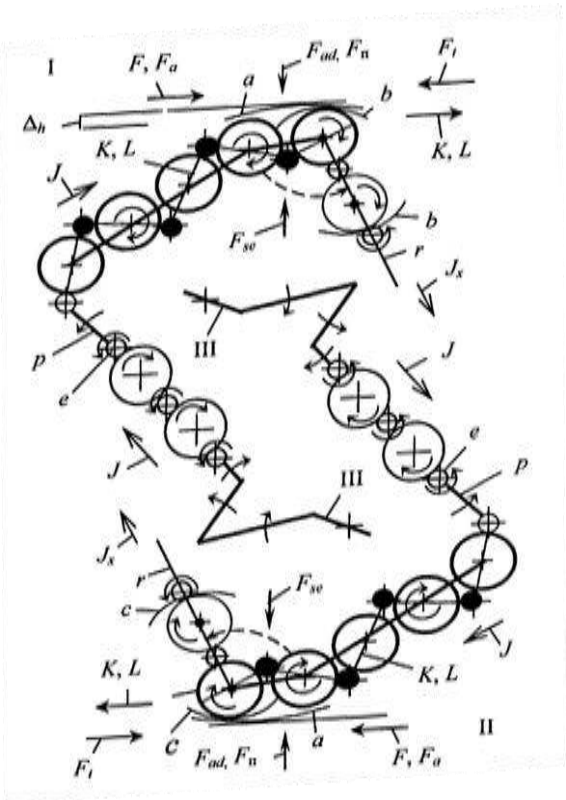


Рис. 3. Упрощенная схема строения и функционирования ветвей связи; F_{se} – упруго-центробежная сила

Поступательное перемещение третьего тела и в целом фрикционной связи происходит в веществе поверхностного слоя со скоростью

$$V_3 = (V_t + V_c)/2.$$

Захват энергии окружающей среды и подвод энергии среды в систему осуществляется петлями, образуемыми *K*, *L*-пленками, производимыми связью (рис. 4). Указанное происходит посредством возникновения весьма тонких потоков среды $J_к$, преобразуемых в пленку, и тепловых вспышек, образуемых мельчайшими частицами $e_к$ – агентами захвата, которые, осуществляя захват энергии и массы среды, затем втягиваются внутрь связи петлями, образуемыми пленкой. В результате возникает поток подводимой энергии J_x .

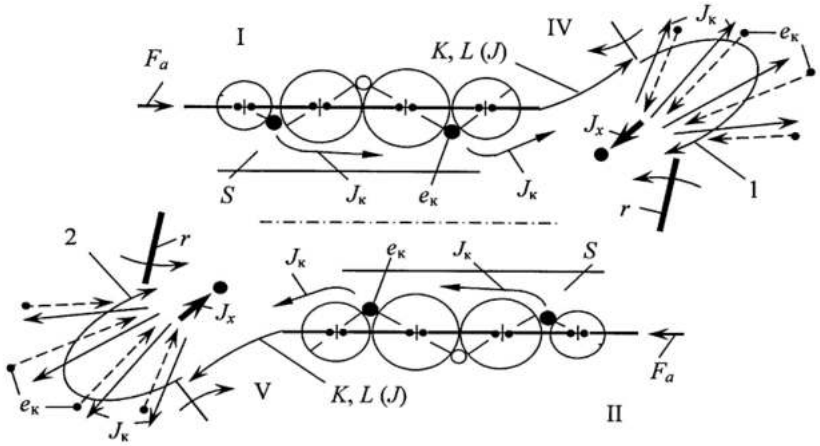


Рис. 4. Схема захвата и подвода энергии среды в системе

Разработка схемы строения и функционирования связи позволяет перейти к построению модели первичного процесса взаимодействий. Схема начальной фазы процесса (предварительного смещения и страгивания) представлена на рис. 5. Из схемы следует, что

активная ветвь *p*, развивающая движущую силу F_a, а также действие внешней силы *F*, преодолевая силу трения, оказываемую пассивной ветвью, осуществляют весьма малые относительные тангенциальные перемещения тел. Одновременно происходит продольное сжатие пассивной ветви. При этом участки пассивной и активной ветвей совершают упругие угловые перемещения (показано дуговыми стрелками на рис. 5, *а*). Активная и пассивная ветви в указанной фазе процесса находятся в состоянии сцепления с подслоем тел и свободное тангенциальное перемещение тел в этом состоянии невозможно. Основные перемещения системы – нормальные. Данный процесс формирует вихревые складки *d* в пассивной ветви вблизи подслоя тел (рис. 6, *а*). Указанное сопровождается упругими деформациями кручения третьего тела вследствие поворота связанных с ним стержневых участков 1_r пассивных ветвей. Одновременно со стороны третьего тела действует возрастающее тянущее усилие F_τ на образующиеся складки, стремящееся оторвать концы пассивной ветви и складки *d* от подслоя тел и переместить их в зону расположения третьего тела (рис. 5, *б*). Когда силы *F* и F_a достигают предельных значений, возникает режим излучения потока энергии складки *J* в направлении подслоя. При встрече потока *J* с плотными слоями подслоя возникают вспышки 1 и 2 (рис. 4, 6, *б*), захват энергии и далее – образование потока подводимой энергии (отраженный поток J_x).

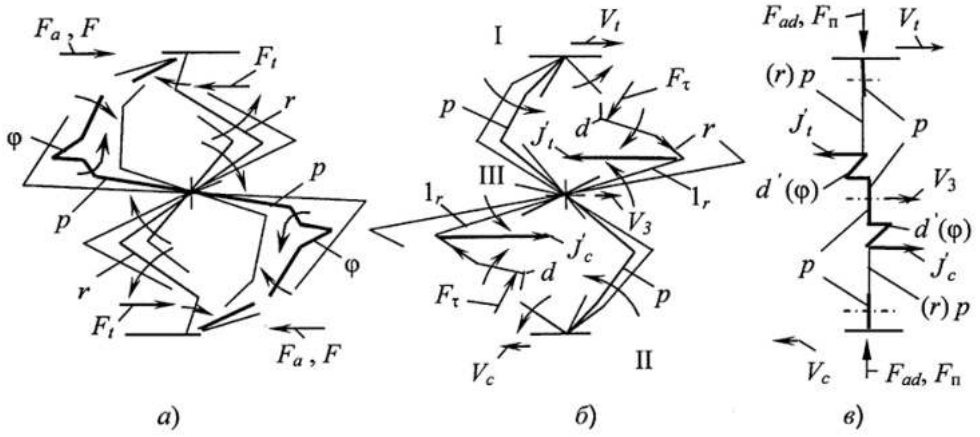


Рис. 5. Схема процесса предварительного смещения *(а)* и страгивания *(б, в)*; система контактных вихрей не показана

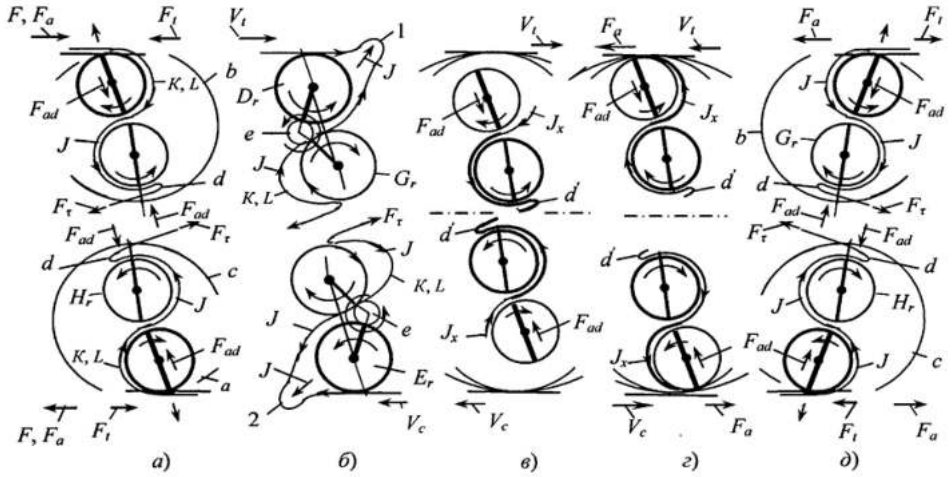


Рис. 6. Схема реализации основных фаз процесса захвата и подвода энергии среды в систему; e, *Dr, Er, Gr Hr* – элементы вихревой структуры ветвей

Если величина сил *F* и F_a недостаточна для страгивания тел, поток J_x возвращается обратно в зону излучения и подводимая энергия потоков сосредоточивается в зонах складок d' (рис. 6, *в*) и далее вновь излучается в направлении подслоя вдоль оси стержней пассивной

ветви. В процессе излучения потока происходит превращение подведенной энергии в энергию поворота пассивных стержней и действие новых движущих сил F_a на тела, уже в направлении, противоположном силам F (рис. 6, *г*). Пассивная ветвь становится активной и ее действие вызывает малые перемещения тел в направлении сил F_a, вследствие чего бывшая активная ветвь становится пассивной.

Далее в пассивной ветви, подобно предыдущему, происходит образование складок d вблизи подслоя и протекание процесса аналогично предыдущему с учетом перемены знака сил F_a (рис. 6, *д*) и переход системы в состояние, аналогичное исходному (рис. 6, *а*). Далее осуществляется многократное воспроизводство цикла взаимодействий. Указанный процесс представляет собой процесс статического контактирования тел, при котором происходит накопление подводимой энергии в неподвижных зонах складок d' (фреттинг-процесс), характеризующийся повышенной внутренней энергией упругопластического поглощения и интенсивными разрушением и изнашиванием.

Из приведенного следует, что процесс захвата и подвода энергии составляет некоторую кратную гармонику в составе первичного процесса, частота которой равна удвоенной частоте основного первичного процесса взаимодействий.

При действии на тела сил F и F_a, достаточных для осуществления страгивания, происходит быстрое увеличение расстояния между телами, их расцепление и отрыв пассивных ветвей от подслоя. Процесс характеризуется интенсивным изменением направления поворота стержня 1_r пассивной ветви, освобождением энергии упругих деформаций кручения третьего тела и возникновением присоединенных потоков J'_t и J'_c, направленных противоположно движению соответствующих тел. Вблизи подслоя каждого из них возникает присоединенный поток (см. рис.5, *б*). При этом происходит интенсивное сведение активной и пассивной ветвей при обеспечении сцепления активной ветви с подслоем. Состояние полного сведения ветвей и перемещения складки d' в зону расположения третьего тела (рис. 5, *в*) завершает переходное состояние системе и является начальным состоянием $1'$ непрерывного стационарного перемещения тел (рис. 7). Переход от предварительного смещения к страгиванию, осуществляющийся скачком и являющийся одним из элементов общего процесса повышения уровня организации системы, обеспечивает возможность непрерывного однонаправленного действия сил F_a и, соответственно, однонаправленного относительного тангенциального перемещения тел.

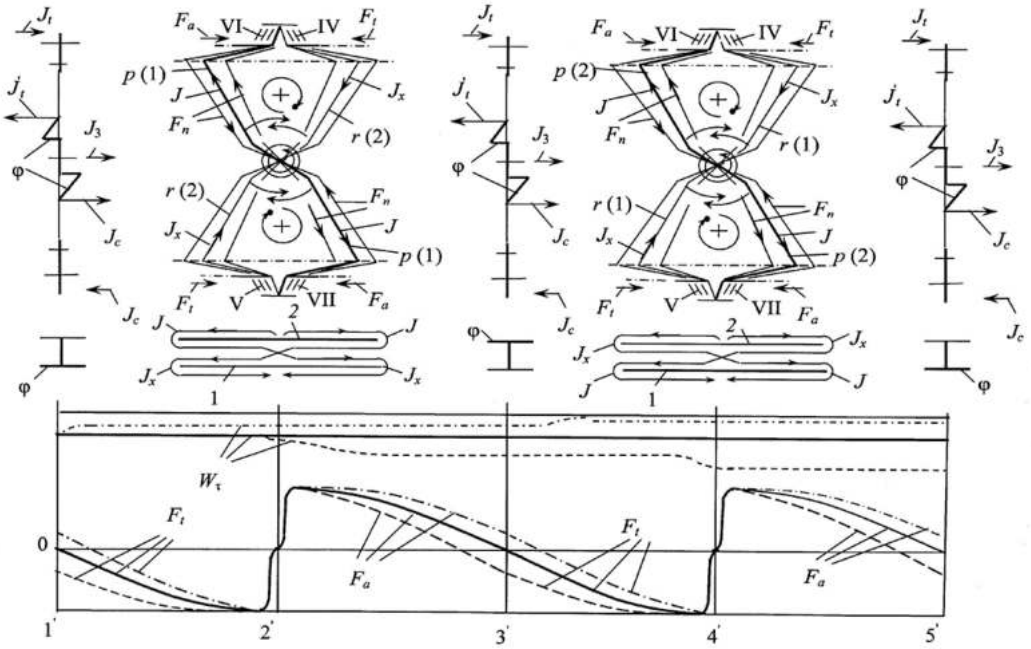


Рис. 7. Схема процесса стационарного движения в системе (в средней части рисунка приведен вид системы сверху); штрих-пунктир – режим преобладания движущих сил, штриховые линии – преобладания сил трения

Состояние 1' характеризуется максимумом скорости и энергии движения потоков J'_t и J'_c, максимумом сил F_{ad} и продольной деформации пассивной (опорной) ветви связи, а также максимумом упругой и внутренней энергии складок d' (максимумом значений потенциала φ). Силы F_a и F_t в этом состоянии равны нулю, пассивная ветвь становится активной ветвью системы.

В состояниях 1'-2' происходит превращение энергии потоков J'_t и J'_c в энергию деформаций кручения третьего тела противоположного знака и, одновременно, превращение энергии распрямляющихся складок d', содержащих подведенную энергию среды, в энергию первичных потоков J (процесс излучения импульса). Одновременно, вследствие действия моментов сил натяжения Z-пленок (сил F_n, рис. 2), происходит усиление деформаций кручения и восполнение энергии этих деформаций. Со стороны новой, сцепленной с подслоем пассивной ветви начинает действовать сила трения, а свободные концы новой активной ветви сближаются с подслоем тел.

В состоянии 2' энергия движения потоков J становится равной нулю, а энергия деформаций кручения третьего тела достигает максимума. Вследствие возникновения сцепления концов активных ветвей с поверхностью подслоя тел и толкающего действия тангенциальных движущих сил F_a на тела активной ветвью, начинается превращение энергии упругих деформаций кручения в энергию относительного однонаправленного тангенциального перемещения тел W_τ.

В состояниях 2'-3' процесс в значительной степени аналогичен процессу предварительного смещения и страгивания. Происходит преодоление сил трения, образование вихревых складок d в пассивной ветви, процесс скручивания третьего тела, захват и подвод энергии среды внутрь связи, отрыв пассивной ветви и складок d' от подслоя тел, и движение складок в направлении третьего тела. Указанные состояния системы соответствуют фазе отражения волнового импульса от подслоя тел (возникновения потоков J_x) и их поглощения третьим телом.

Далее система приходит в состояние 3', аналогичное состоянию 1' с учетом перемены знака составляющей потенциала деформаций кручения третьего тела и возможного возрастания энергии однонаправленного движения элементов системы и ее потенциальной энергии вследствие ее подвода извне.

Протекание процесса в его втором полупериоде (состояния 3'-5') осуществляется аналогично первому с учетом взаимного изменения функций ветвей связи и знака потенциала. Далее осуществляется непрерывное воспроизводство процесса в соответствии с приведенной схемой.

Наиболее эффективным режимом действия движущих сил является режим функционирования организованной фрикционной связи и трибосистемы, при котором, вследствие достижения повышенного уровня энергии в полях сил, нормальных поверхности, основная роль полей сил переходит к полям сил тяготения и нормальных упругих сил $F_{\text{п}}$ (режимы скачков и полета), при которых преобразование энергии, подведенной в систему, и действие движущих сил происходит с максимальной интенсивностью [2].

Выводы

1. Трение тел представляет собой всеобщий единственный и эффективный фактор действия внешних и внутренних движущих сил, формирования и движения тел и естественных объектов. Процесс обеспечивается захватом, подводом и преобразованием энергии и массы среды, являющимися ресурсом процесса направленного движения.

2. Подвод и преобразование энергии обеспечивается структурой и кинетикой связи и трибосистемы и организованными тепловыми процессами, в особенности тепловыми вспышками, генерируемыми фрикционным взаимодействием. Тепловые потери и действие сил трения является необходимым условием обеспечения режима движущих сил.

3. Основу структуры и кинетики связи и трибосистемы составляют формирование жестких контактных стержневых систем, нормальных поверхности, и пленочные эффекты,

играющие исключительно важную роль в реализации механизма взаимодействий.

4. Важнейшим внутренним параметром трибосистемы является трибопотеницал, численно равный энергии нормального перемещения носителя трибоимпульса в полях поверхностных и потенциальных сил, отнесенной к массе носителя.

5. Увеличение эффективности действия движущих сил и повышение их мощности находится в прямой зависимости от абсолютной величины потенциала, определяющей направление решения технических задач и развития технических и естественных систем.

Библиографический список

1. **Силин А.А.** Трение и его роль в развитии техники / А.А. Силин // М.: Наука, 1976. – -175 с.

2. **Бородай А.В.** О механизме действия движущих сил в трибосистемах / А.В. Бородай // Трибология – машиностроению: Труды XIII Международной научно-технической конференции. – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 47-53.

УДК 629.4.027.512: 539.62 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_117

О.С. Веригин, (Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения**), А.А. Зарифьян,** д-р техн. наук, **Н.В. Талахадзе (**Ростовский государственный университет путей сообщения**)**

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЭЛЕКТРОВОЗА ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ

Аннотация. *Выполнен анализ надежности фрикционных соединений элементов колесной пары электровоза под влиянием электромеханических процессов в тяговом приводе.*

The analysis of the frictional connections reliability of the wheelset'S elements of an electric locomotive under the influence of electromechanical processes in the traction drive is carried out.

Ключевые слова: колесная пара локомотива, фрикционное соединение; тяговый привод, электромеханические процессы.
Keywords: traction electric drive, contact network, mathematical model, transfer function, traction motor

Введение

Движение поезда происходит под действием сил тяги, которые формируются в контактах «колесо – рельс» локомотива и являются результатом преобразования энергии в тяговом приводе [1, 2]. Большое влияние на образование силы тяги оказывает также состояние рабочих поверхностей колес и рельсов в зоне контакта.

Для электровоза переменного тока источником энергии является контактная сеть, напряжение которой понижается тяговым трансформатором и преобразуется в постоянное напряжение в выпрямительно-инверторном преобразователе. Далее происходит процесс электромеханического преобразования энергии в коллекторных тяговых двигателях, в результате чего вырабатывается вращающий момент. Момент тяговых двигателей через тяговые редукторы передается на колесные пары и в контакт колес с рельсовым полотном, в котором происходит преобразование вращательного движения, создаваемого тяговыми

двигателями, в поступательное движение электровоза и состава. При этом, управление движением электровоза производится машинистом через систему управления тяговым электроприводом. Вопросы расчета и моделирования электромеханических процессов в тяговых электроприводах как грузовых, так и пассажирских магистральных электровозов переменного тока, а также, синтеза систем управления тяговых электроприводов с коллекторными тяговыми двигателями рассмотрены в [3 – 6].

Одной из важнейших особенностей колесной пары электровоза с точки зрения исследования вопросов надежности является взаимосвязь элементов её конструкции и выполняемых ими функций в составе механической части тягового электропривода. Помимо реализации силы тяги и преобразования вращательного движения тяговых двигателей в поступательное движение электровоза с ведомым составом колесные пары выполняют также следующие функции: направляют электровоз по рельсовому полотну, воспринимают статические и динамические нагрузки в контакте колес с рельсами [7, 8].

В настоящей работе выполнен анализ надежности фрикционных соединений элементов колесной пары электровоза под влиянием электромеханических процессов в тяговом приводе.

1. Конструкция колесной пары

Конструкция колесной пары грузового электровоза с опорно-осевым подвешиванием тягового двигателя и опорно-осевой двухсторонней тяговой механической передачей проиллюстрирована рисунком 1. На ось колесной пары 1 при помощи посадки с натягом устанавливаются колеса 2, 3. Колесо магистрального электровоза представляет собой сборочную единицу, состоящую из колесного центра 6, на который, также, посадкой с натягом устанавливается зубчатое колесо тягового редуктора 4, 5 и бандаж 7, который фиксируется кольцом 8, которое предназначено для предотвращения сползания бандажа с колесного центра в процессе движения.

При установке колес на ось колесной пары применяется технология холодной напрессовки с усилием в диапазоне от 1080 до 1470 кН. Сборка колеса, т. е. установка бандажа на обод колесного центра и установка зубчатого колеса тягового редуктора на удлиненную ступицу колесного центра осуществляется горячей напрессовкой и посадкой с натягом. При этом, величина натяга для бандажей составляет от 1,3 до 1,7 мм, а для зубчатых колес – от 0,25 до 0,33 мм. Надежность соединения зубчатого колеса и колесного центра проверяется испытательным крутящим моментом 80±5 кНм, смещение не допускается [9].

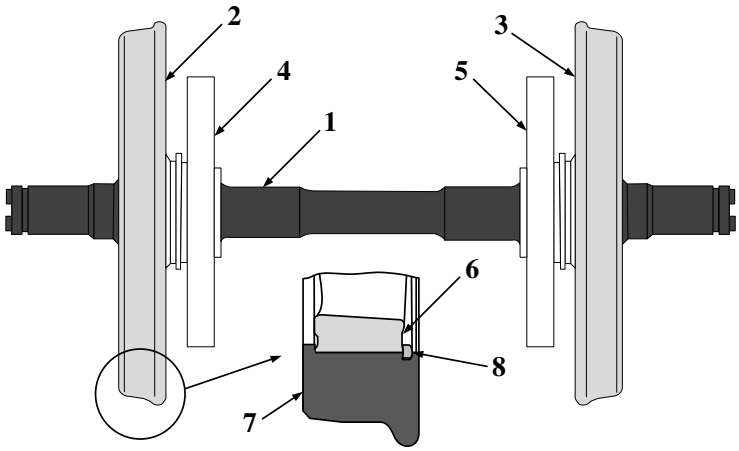


Рис. 1. Конструкция колесной пары магистрального грузового электровоза

Ось колесной пары изготавливают методом ковки из специальной углеродистой стали ОсЛ, обладающей высокой вязкостью и прочностью: предел прочности при растяжении 539 – 597,8 МПа, относительное удлинение 21 – 23 %, ударная вязкость 490 – 686 кПа. Колесные центры выполняют из стального литья повышенного качества, при отливке заготовок

применяется сталь марки 25Л, которая обладает следующими характеристиками: предел прочности на растяжение – не менее 441 МПа, относительное удлинение 19 %. Зубчатые колеса изготавливают из углеродистой стали марки 55, характеризующейся следующими показателями после объемной закалки с высоким отпуском: предел прочности 931 МПа, предел текучести 588 МПа, относительное удлинение 12%. Бандажи колесных пар изготавливают из высококачественной стали марки 2, которая характеризуется следующими показателями: временное сопротивление разрыву от 930 до 1110 МПа, относительное удлинение 10 %, ударная вязкость 294 кПа.

Колесная пара является элементом механической части, который непрерывно находится под нагрузкой. Вертикальная нагрузка от веса электровоза создает усилия изгиба, действующие на ось колесной пары, а вращающий момент от тягового двигателя создает усилие кручения. При вращении колесной пары ось подвергается знакопеременной нагрузке в силу наличия усилия изгиба. Усилия кручения также возникают при вписывании электровоза в криволинейные участки железнодорожного пути в моменты, когда колесо на одном конце оси проскальзывает относительно колеса на другом конце этой же оси. Перечисленные усилия кручения воздействуют на фрикционные соединения элементов конструкции колесной пары, при этом, наиболее нагруженным от скручивающей нагрузки является соединение бандажа с колесным центром, т. к. данное соединение жестко воспринимает все воздействия пути и является узлом, к которому (в контакте колеса с рельсом) приложены уравновешивающие друг друга усилие от момента тягового двигателя и сила тяги [7, 9].

2. Эффективность реализации силы тяги

Из теории локомотивной тяги [1, 2] известно, что эффективность реализации локомотивом силы тяги и, соответственно, параметры его движения определяются основным законом локомотивной тяги, в соответствии с которым, сила трения покоя (т. е. сила трения в контакте колес с рельсами при отсутствии скольжения), которая является реакцией на момент, подводимый от тяговых двигателей к осям колесных пар, не может превосходить предельного значения, которое в свою очередь определяется условиями трения (параметрами сцепления колес с рельсами):

$$F_{\text{К}} \leq F_{\text{К}\,max},$$

где $F_{\text{К}}$ – некоторое текущее значение касательной силы тяги в контакте колеса с рельсом;

$F_{\text{К}\,max}$ – предельное значение касательной силы тяги в контакте колеса с рельсом.

Правая часть неравенства определяется свойствами контакта колес с рельсами, т. е. механическими и фрикционными параметрами соприкасающихся материалов. К основным факторам, влияющим на значение $F_{\text{К}\,max}$ в каждом конкретном случае, можно отнести состояние поверхностей катания колес и рельсов (наличие или отсутствие механических повреждений, которые в процессе движения вызывают дополнительные динамические воздействия в механической системе электровоза, носящие случайный характер), чистоту поверхностей катания колес и рельсов (наличие или отсутствие между контактирующими поверхностями инородных включений, которые могут иметь свойства лубрикантов, что значительно снижает силу трения), метеорологические параметры окружающей среды (главным образом – температура воздуха), определяющие состояние материалов колес и рельсов.

Левая часть неравенства определяется моментом, подводимым к оси колесной пары от тягового двигателя, на который в свою очередь влияют: действия локомотивной бригады, режим работы контактной сети, параметры настройки системы управления тяговым электроприводом электровоза.

Таким образом, большое значение в вопросе стабильности контакта колесного центра и бандажа имеют факторы, тем или иным образом связанные с электромеханическими процессами в тяговой системе электровоза. С этой точки зрения актуальной является задача

изучения влияния электромеханических процессов в тяговом электроприводе электровоза на неподвижность прессового соединения колесного центра и бандажа, т. к. указанные процессы являются управляемыми, что дает возможность повышения надежности механической части тягового электропривода путем превентивного воздействия.

В [10] приведена статистика за период 2005…2019 годов по проворотам бандажей колесных пар для пассажирских и грузовых магистральных электровозов. Наиболее подверженными отказам механической части в виде проворота бандажа колесной пары являются грузовые магистральные электровозы переменного тока серии 3ЭС5К, в эту же статистику необходимо включить и модификации 2ЭС5К и 4ЭС5К.

Надежность фрикционного соединения бандажа и колесного центра определяется из условия неподвижности соединения натягом [11 – 13], которое заключается в том, что усилие, нагружающее данное соединение не может превышать значение, обеспечиваемое величиной натяга, с которым соединены колесный центр и бандаж. Усилие соединения колесного центра и бандажа зависит от величины контактного напряжения и равномерности его распределения вдоль поверхности сопряжения деталей. Однако, в процессе эксплуатации электровоза на его механическую систему воздействует значительное количество факторов, которые нарушают равномерное распределение контактного давления и заложенные в конструкцию при сборке параметры, тем самым делая колесную пару более уязвимой к возникновению проворотов бандажей.

3. Нарушение условий сцепления колесо - рельс и срыв в боксование

При нарушении условий сцепления колес с рельсами и последующем срыве колесной пары в боксование происходит интенсивное повышение ее частоты вращения, при восстановлении условий сцепления колес с рельсами процесс частота вращения колесной пары снижается до значения, соответствующего скорости движения электровоза практически скачкообразно. Оба описанных явления для механической части электровоза сопровождаются высокими динамическими моментами ударного характера. Высокие динамические нагрузки приводят к проворотам бандажей колесных пар, сползанию зубчатых колес тяговых редукторов со ступиц, излому зубьев тяговых зубчатых передач [2].

4. Воздействие температурных полей

Воздействие температурных полей на элементы конструкции колесной пары заключается в изменении их геометрических параметров [14]. В соответствии с приведенным выше кратким описанием технологии сборки колесной пары, материалы, из которых изготовлены ее элементы, обладают различными характеристиками и, соответственно, будут по-разному реагировать на воздействие высоких или низких температур.

При эксплуатации электровоза в условиях низких температур происходит уменьшение соединительных диаметров бандажа и колесного центра с различной интенсивностью, что приводит к ослаблению натяга и, соответственно, снижению усилия, обеспечиваемого данным натягом. При движении электровоза длительное время в режиме фрикционного торможения или при экстренном торможении происходит интенсивный нагрев бандажа и, соответственно, увеличение его посадочного диаметра. В результате данного явления также происходит ослабление натяга и снижение контактного давления.

5. Воздействие весовой нагрузки

Кузов электровоза опирается на ось колесной пары через буксовые узлы, т. е. к буксовым узлам приложено действие веса P электровоза. Данное воздействие создает изгибающий момент T в соединении колесного центра и бандажа, которое в свою очередь вызывает перераспределение контактного давления в рассматриваемом соединении по направлению оси вращения колесной пары и вдоль окружности поверхности сопряжения. Эпюры контактных напряжений p приведены на рисунке 2. Обозначением p' показано

распределение контактного давления вдоль поверхности сопряжения без учета воздействия веса электровоза.

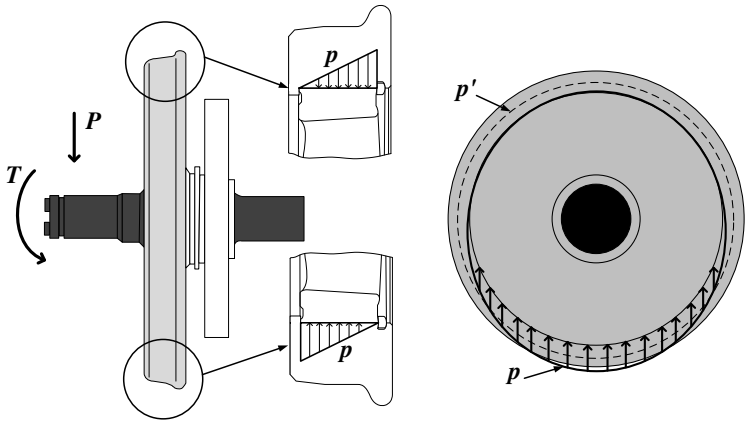


Рис. 2. Эпюры напряжений в соединении колесного центра и бандажа при воздействии изгибающего момента

Представленные эпюры контактных напряжений показывают, что действие изгибающего момента, создаваемого весом электровоза в контакте колесного центра и бандажа, обусловливает неравномерность напряженных состояний элементов конструкции, характеризующуюся изменением контактного напряжения вдоль оси вращения колесной пары от нуля до удвоенного номинального значения. При этом, вдоль окружности поверхности сопряжения колесного центра и бандажа напряженное состояние смещается к области контакта колеса с рельсом.

6. Износ и повреждения бандажа в процессе эксплуатации

В соответствии с технологией изготовления колесных пар, формирование профиля бандажа осуществляется токарным способом. В процессе эксплуатации электровоза происходит износ бандажа, заключающийся как в естественном истирании материала бандажа, так и в появлении повреждений и эксплуатационных дефектов, таких как трещины, раковины, ползуны, выкрашивание поверхности и т. д. Перечисленные дефекты представляют собой концентраторы напряжений в металле, что не только значительно снижает стабильность соединения колесного центра и бандажа, но и является фактором, повышающим вероятность механического разрушения бандажа при несвоевременном ремонте колесной пары. Изношенная поверхность катания бандажа восстанавливается (как и в случае ее первоначального формирования) токарным способом, при этом, происходит уменьшение толщины бандажа. Постепенное уменьшение толщины бандажа приводит к снижению стабильности его соединения с колесным центром в силу снижения его жесткости. Это приводит к тому, что в процессе эксплуатации колесо по мере износа и проточек бандажа становится более подверженным распределению контактного напряжения, показанного на рисунке 2.

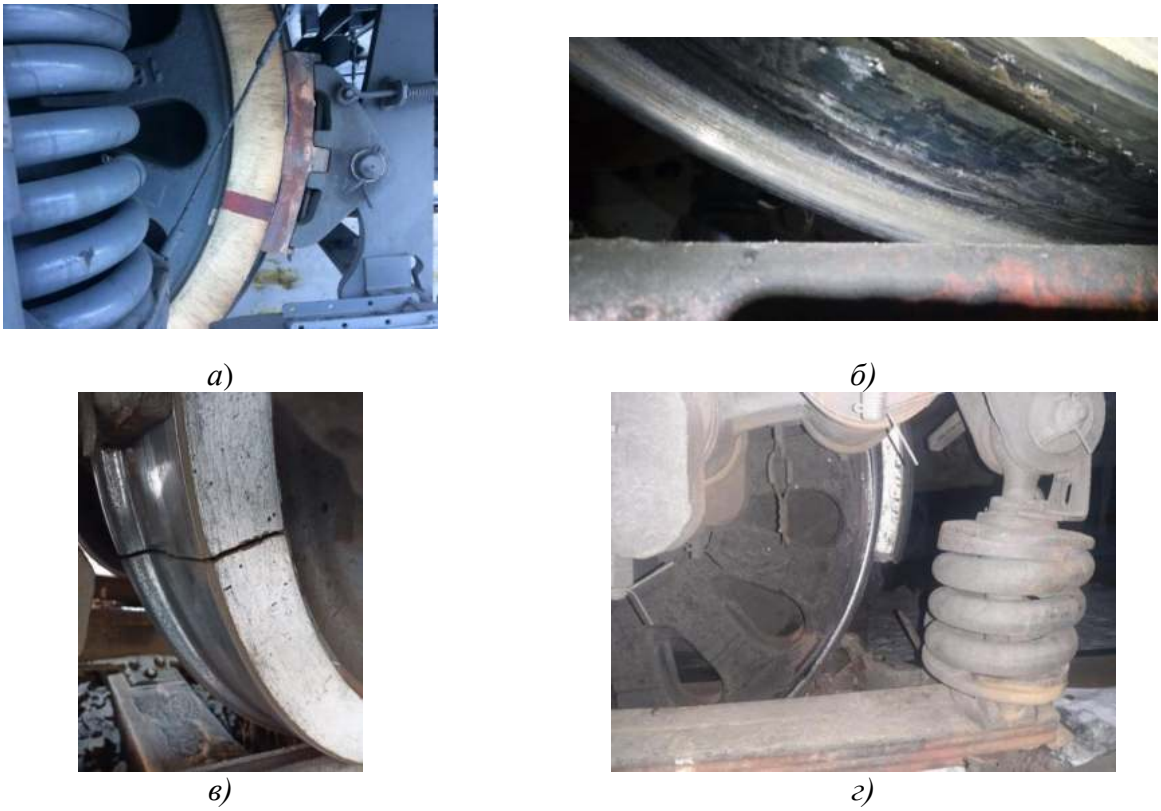
7. Повреждения колесной пары в условиях эксплуатации

В реальных условиях перечисленные факторы воздействуют на колесные пары комплексно, в результате чего возникают эксплуатационные повреждения и износ (рисунок 3).

На рисунке 3а показан первичный проворот бандажа колесной пары, что видно по смещению меток на бандаже и колесном центре. Данное явление допускает дальнейшую эксплуатацию грузового электровоза с нанесением новых меток. Эксплуатация электровоза должна быть прекращена при возникновении повторного проворота бандажа.

На рисунке 3б показан ползун на поверхности катания бандажа. Данное явление возникает, например, при экстренном или слишком интенсивном фрикционном торможении, а также, при возникновении юза колесных пар в случае ухудшения условий сцепления колес

с рельсами. Ползун, главным образом, является причиной периодических ударных нагрузок в механической части, т. к. его наличие на поверхности катания бандажа нарушает геометрию круга катания. Негативное влияние ударных нагрузок на техническое состояние бандажа заключается в развитии микротрещин, особенно в случае наличия на бандаже иных повреждений, дефектов и конструктивных особенностей, являющихся концентраторами механических напряжений.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 3. Эксплуатационные повреждения колесных пар магистральных электровозов

На рисунке 3в показана поперечная трещина бандажа. Причиной данного явления чаще всего являются ударные нагрузки в совокупности с дефектами металла, из которого изготавливается бандаж. Также, дополнительной причиной поперечной трещины может являться степень износа и проточки, т. е. текущее значение толщины бандажа, а, следовательно, его жесткость.

Комбинации и степень воздействия указанных выше факторов практически не поддаются точной формализации и учету при моделировании. Последствия воздействия рассмотренных факторов, а, главным образом, наличия концентраторов напряжений (причем, как конструкционных, так и эксплуатационных), метеорологических и климатических условий, а также, режимов работы тягового электропривода хорошо демонстрируются опытом эксплуатации грузовых электровозов постоянного тока серии 2ЭС10. Значительное количество исследований [15–19] посвящено проблеме преждевременного разрушения и выхода из строя бандажей электровозов этой серии. Пример такого явления показан на рисунке 3г. В результате выполненных экспертиз и исследований установлено, что разрушения бандажей происходят по причине наличия в материале, из которого они изготавливаются, неметаллических включений. Концентратором напряжения в конструкции бандажа является клеймо, нанесенное на торцовую внешнюю поверхность бандажа. В сочетании с эксплуатацией электровоза в условиях низких температур, а также со значениями реализуемых мощности электровоза и силы тяги, т. е. с работой тягового электропривода, это приводит к разрывам бандажей, а также, к сколам металла в области гребня. В обоих случаях повреждения не допускают эксплуатации электровоза.

Заключение

В целом при воздействии перечисленных выше факторов увеличивается уязвимость прессового соединения колесного центра и бандажа к изменениям электромагнитного момента тягового двигателя, подводимого к колесной паре. Резкое изменение момента может быть вызвано двумя основными факторами: 1) броском напряжения в контактной сети, и 2) неправильные действия машиниста.

Таким образом, особый интерес с точки зрения повышения надежности и безопасности работы современных электровозов представляют вопросы управления тяговым электроприводом в части ограничения по скорости изменения усилий во фрикционных соединениях элементов конструкции колесной пары.

Библиографический список

1. **Кузьмич, В.Д.** Теория локомотивной тяги: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / В.Д. Кузьмич, В.С. Руднев, С.Я. Френкель // М.: Изд-во «Маршрут», 2005. – 448 с.

2. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд [и др.] // М.: Транспорт, 1995. – 294 с.

3. **Веригин, О.С.** Комплексная математическая модель тягового электропривода электровоза ЭП1М для исследования динамики механической передачи / О.С. Веригин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2015. - № 1(69). – С. 14 – 26.

4. **Веригин, О.С.** Математическая модель для исследования электромагнитных процессов в силовых цепях электровоза ЭП1М в режиме тяги / / О.С. Веригин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2017. - № 4(78). – С. 38 – 47.

5. **Веригин, О.С.** Математическое описание тяговых электроприводов современных электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями / О.С. Веригин // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство», Том 2. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2020. – С. 70 – 74.

6. Компьютерное моделирование взаимодействия СМУД и ВИП в режиме тяги / О.С. Веригин [и др.] // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство», Том 3. Технические и экономические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2020. – С. 289 – 293.

7. **Калинин, В.К.** Электровозы и электропоезда / В.К. Калинин // М.: Транспорт, 1991. – 480 с.

8. **Быстрицкий, Х.Я.** Устройство и работа электровозов переменного тока: Учебник для техн. школ ж.-д. трансп. / Х.Я. Быстрицкий, З.М. Дубровский, Б.Н. Ребрик // 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1982. – 456 с.

9. **Дубровский, З.М.** Грузовые электровозы переменного тока: Справочник / З.М. Дубровский, В.И. Попов, Б.А. Тушканов // М.: Транспорт, 1991. – 471 с.

10. **Веригин, О.С.** Анализ статистики проворотов бандажей колесных пар магистральных электровозов / О.С. Веригин, А.А. Зарифьян // Вестник РГУПС. – 2019. – № 4. – С. 49–54.

11.**Иванов, М.Н.** Детали машин / М.Н. Иванов // М.: Высш. шк., 1991. – 383 с.

12. **Гузенков, П.Г.** Детали машин / П.Г. Гузенков // М.: Высш. школа, 1982. – 351 с.

13. **Иосилевич, Г.Б.** Детали машин / Г.Б. Иосилевич // М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

14. **Меланин, В.М.** Моделирование нестационарного температурного поля, формирующегося в элементах колеса при торможении / В.М. Меланин // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – №5(42). – С. 73 – 76.

15. **Устинова, Е.О.** Анализ причин повреждения бандажей локомотивов в виде скола металла на гребне / Е. О. Устинова, Д. Л. Мерсон, Е. Д. Мерсон // Вектор науки ТГУ. – 2013. - №3. – С. 276 – 279.

16. Исследование причин преждевременного разрушения локомотивных бандажей и разработка мероприятий по повышению эксплуатационного ресурса бандажей / А.А. Бакунова [и др.] // Вектор науки ТГУ. – 2013. - №3. – С. 32 – 36.

17. **Буйносов, А.П.** Влияние условий эксплуатации на износ бандажей / А.П. Буйносов // Локомотив. – 1995. – № 1. – С. 33–34.

18. **Мерсон, Д.Л.** Анализ причин разрушения бандажей локомотивов по знакам маркировки / Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2013. – № 3. – С. 74–77.

19. **Буйносов, А.П.** О некоторых причинах образования дефектов бандажей колесных пар электровозов 2ЭС10 «Гранит» / А.П. Буйносов, Д.С. Денисов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. С. 113–115.

УДК 621.833.51 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_124

А.А. Приходько, канд. техн. наук (Кубанский государственный технологический университет)

КИНЕТОСТАТИКА ОДНОСАТЕЛЛИТНОГО ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА ПРЕРЫВИСТОГО ДВИЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Аннотация. *Работа посвящена проведению силового анализа односателлитного планетарного механизма прерывистого движения, работающего в составе привода ленточного конвейера. Построены расчетные схемы звеньев механизма, составлены и решены уравнения кинетостатического равновесия. В результате анализа получены реакции в кинематических парах и уравновешивающий момент на входном валу механизма, а также построены графики их функций от угла поворота входного вала.*

The work is devoted to the force analysis of a single-satellite planetary mechanism of intermittent motion, operating as part of a belt conveyor drive. The calculation schemes of the links of the mechanism are constructed, the equations of kinetostatic equilibrium are drawn up and solved. As a result of the analysis, the reactions in kinematic pairs and the balancing moment on the input shaft of the mechanism were obtained, as well as graphs of their functions from the angle of rotation of the input shaft were constructed.

Ключевые слова: прерывистое движение, планетарный механизм, эллиптические зубчатые колеса, силовой анализ, моделирование механического привода.
Keywords: intermittent motion; planetary gear; elliptical gears; force analysis; mechanical drive simulation.

Конвейеры являются одним из важных компонентов транспортных систем и используются практически во всех отраслях машиностроения. Проектирование привода конвейера в настоящее время является достаточно известной и широко исследованной задачей, особенно в том частном случае, если лента конвейера движется с постоянной скоростью. Однако на многих технологических линиях требуется остановка конвейерной ленты для проведения различных операций над продуктом, и эта задача может быть решена использованием механизмов прерывистого движения. Существующие на данный момент механизмы постоянной структуры с односторонней связью (храповые, анкерные механизмы) и

механизмы переменной структуры (мальтийские механизмы, звездчатые механизмы, неполные зубчатые колеса) характеризуются высокими нагрузками на звенья вследствие ударов, возникающих в начале или конце фазы движения [1, 2].

В последние годы ученые все больше внимания уделяют исследованиям механических передач с некруглыми зубчатыми колесами как наиболее эффективному методу реализации нелинейной передаточной функции [3]. Данный вид механических преобразователей также позволяет реализовать прерывистое движение выходного звена без разрыва кинематической цепи. Некруглые колеса могут иметь различную форму, но наиболее распространены эллиптические [4, 5]. В основном это связано с обширными исследованиями их геометрии и кинематики [6, 7], решением различных задач их изготовления [8].

Целью настоящей работы является кинетостатический анализ односателлитного планетарного механизма прерывистого движения с эллиптическими зубчатыми колесами, работающего в составе привода конвейера. Упрощенная схема исследуемого привода (рис. 1) включает электродвигатель 1, планетарный механизм прерывистого движения 2 и рабочий орган 3 (ведущий шкив конвейера). Вал электродвигателя соединен напрямую с входным валом исполнительного механизма, а ось ведущего шкива жестко соединена с выходным валом.

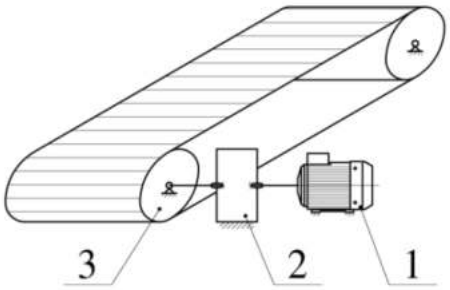


Рис. 1. Схема привода конвейера

Прерывистое движение шкива конвейера обеспечивается за счет механического преобразования равномерного вращательного движения входного вала в движение с остановками выходного вала. Структурная схема планетарного механизма с эллиптическими зубчатыми колесами, позволяющего выполнить данное преобразование, рассмотрена в [9] и приведена на рисунке 2.

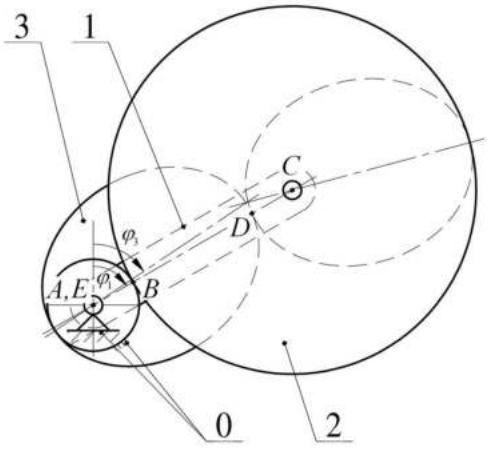


Рис. 2. Структурная схема планетарного механизма

Исследуемый механизм (рис. 2) состоит из стойки 0, трехвершинного звена 2, двухвершинных звеньев 1 и 3, одноподвижных кинематических пар *A*, *C*, *E* и двухподвижных кинематических пар *B*, *D*. Так как планетарный механизм существует в трехподвижном

пространстве (поступательные перемещения вдоль осей *x* и *y* и вращение φ_z вокруг оси *z*), которое традиционно называют «плоским», то при исследовании кинетостатики примем, что все кинематические пары лежат в одной плоскости.

В исследуемом механизме для каждого звена необходимо составить 3 уравнения, всего уравнений 9. Количество неизвестных реакций тоже 9: по 1 реакции в кинематических парах *B*, *D* и по 2 составляющих реакции в кинематических парах *A*, *C*, *E*, а также уравновешивающий момент M_y.

Силовой анализ проведем последовательно для каждого звена. Начнем проводить силовой анализ с 3 звена, так как при освобождении его от связей образуется наименьшее число неизвестных реакций. Приложим к звену действующие на него внешние силы и моменты, а также силы и моменты сил инерции (рис. 3).

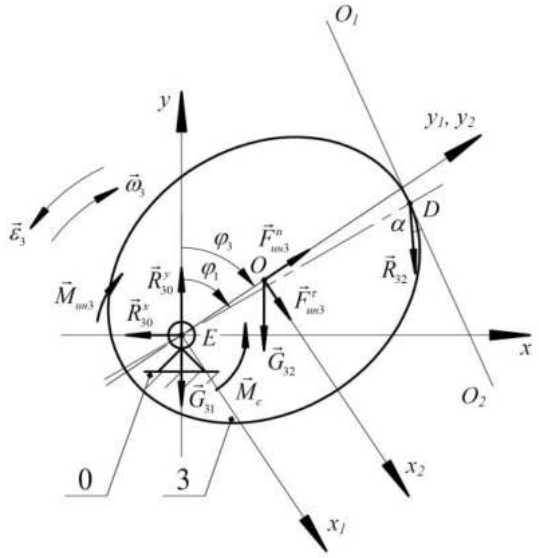


Рис. 3. Схема кинетостатического равновесия звена 3

Звено 3 совершает вращательное движение с остановками и подвергается воздействию следующих сил: реакция $\vec{R}_{30}$ во вращательной кинематической паре *E*, которая определяется через проекции на координатные оси; реакция $\vec{R}_{32}$ в кинематической паре *D*; силы тяжести $\vec{G}_{31}$ и $\vec{G}_{32}$; нормальная $\vec{F}^n_{ин3}$ и тангенциальная $\vec{F}^\tau_{ин3}$ силы инерции, приложенные к центру масс эллиптического колеса; момент сопротивления среды $\vec{M}_c$ и момент сил инерции $\vec{M}_{ин3}$.

Реакция $\vec{R}_{32}$ направлена под углом α к касательной O_1O_2 и, таким образом, с осью *x* составляет угол $\Theta = \gamma - \varphi_3 \pm \alpha$ [10], при этом знак перед углом α определяется тем, какая сторона зуба участвует в зацеплении.

Уравнения кинетостатического равновесия звена 3, суммы проекций всех сил на координатные оси *x* и *y*, и сумма моментов относительно точки *E*, представлены следующим образом:

$$R^x_{30} - R_{32} \cdot \cos\Theta + F^\tau_{ин3} \cos\varphi_3 + F^n_{ин3} \sin\varphi_3 = 0; \quad (1)$$

$$R^y_{30} - R_{32} \cdot \sin\Theta - G_3 - F^\tau_{ин3} \sin\varphi_3 + F^n_{ин3} \cos\varphi_3 = 0; \quad (2)$$

$$M_c - M_{ин3} - F^\tau_{ин3} c - R_{32} \cdot DE \cdot (\cos\Theta \cdot \cos\varphi_1 - \sin\Theta \cdot \sin\varphi_1) - G_{32} \cdot OE \cdot \sin\varphi_3 = 0. \quad (3)$$

Решая уравнение (3), определим реакцию $\vec{R}_{32}$, затем из (1), (2) определим реакции $\vec{R}^x_{30}$ и $\vec{R}^y_{30}$. На рисунке 4 представлены графики функций $\vec{R}^x_{30}(\varphi_1)$, $\vec{R}^y_{30}(\varphi_1)$ и $\vec{R}_{32}(\varphi_1)$.

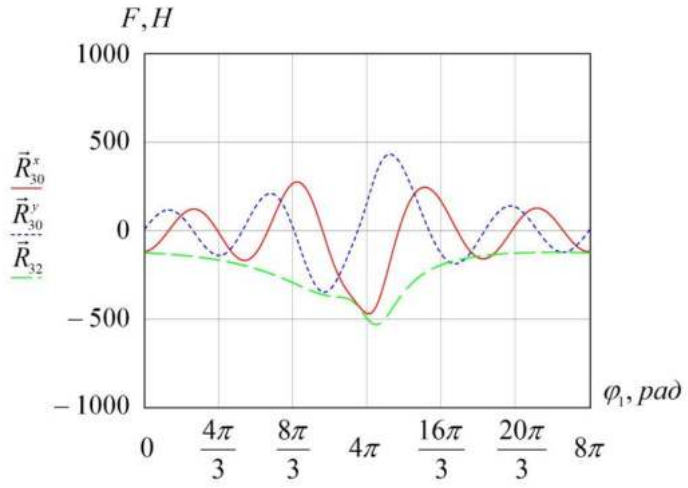


Рис. 4. Графики функций $\vec{R}^x_{30}(\varphi_1)$, $\vec{R}^y_{30}(\varphi_1)$ и $\vec{R}_{32}(\varphi_1)$

Рассмотрим равновесие звена 2, совершающего плоское движение, МЦС – точка *B*. Звено находится под действием следующих сил (рис. 5): реакция $\vec{R}_{21}$ во вращательной кинематической паре *C*, которая определяется через проекции на координатные оси; реакция $\vec{R}_{20}$ в зубчатой кинематической паре *B*; реакция $\vec{R}_{23}$ в зубчатой кинематической паре *D*, которая направлена противоположно найденной реакции $\vec{R}_{32}$; а также силы тяжести и силы инерции, которые приложены к центру масс звена.

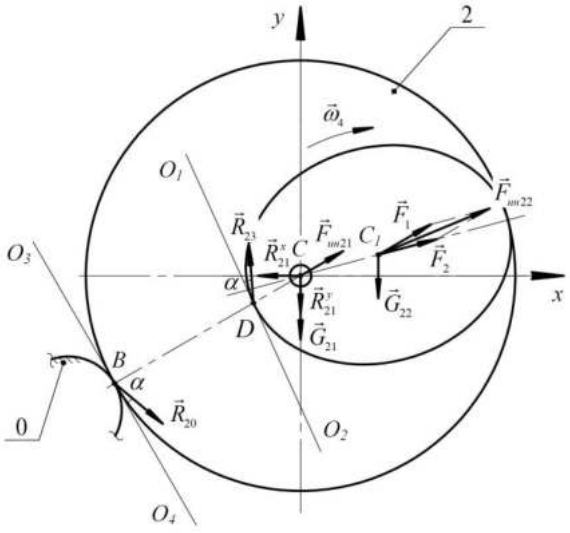


Рис. 5. Схема кинетостатического равновесия звена 2

Реакция $\vec{R}_{20}$ направлена под углом α к касательной O_3O_4 и, таким образом, с осью *x* составляет угол $\psi = -\varphi_1 \pm \alpha$.

Для удобства решения поставленной задачи звено 2 рассматривается как сумма двух тел: тело 2.1 (цилиндрическое колесо и вал сателлита), в котором силы $\vec{G}_{21}$ и $\vec{F}_{ин21}$ приложены к точке *C*, и тело 2.2 (эллиптическое колесо), в котором силы $\vec{G}_{22}$ и $\vec{F}_{ин22}$ приложены к точке C_1.

Найдем ускорения точек *C* и C_1. Так как $\varepsilon_1 = 0$, то $a_C = a^n_C = \omega_1^2 \cdot AC$. Приняв точку *C* за полюс, получим $\vec{a}_{C_1} = \vec{a}_C + \vec{a}_{C_1C}$, где $a_{C_1C} = a^n_{C_1C} = \omega_2^2 \cdot C_1C$ – ускорение точки C_1 относительно полюса *C*.

Искомые силы инерции $\vec{F}_{ин21}$ и $\vec{F}_{ин22}$ определятся:

$$\vec{F}_{ин21} = m_{21} \cdot \vec{a}_C,$$

$$\vec{F}_{ин22} = m_{22} \cdot \vec{a}_{C_1} = m_{22} \cdot \vec{a}_C + m_{22} \cdot \vec{a}_{C_1C}.$$

Введем обозначения $\vec{F}_1 = m_{22} \cdot \vec{a}_C$, $\vec{F}_2 = m_{22} \cdot \vec{a}_{C_1C}$ и запишем уравнения кинетостатического равновесия звена 2:

$$R_{21}^x + (F_{ин21} + F_3) \cdot \sin\varphi_1 + F_4 \sin n\varphi_1 + R_{23} \cdot \cos\Theta + R_{20} \cdot \cos\psi = 0; \quad (4)$$

$$R_{21}^y + (F_{ин21} + F_3) \cdot \cos\varphi_1 + F_4 \cos n\varphi_1 + R_{23} \cdot \sin\Theta + R_{20} \cdot \sin\psi = 0; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &F_1 \cdot CC_1 \cdot (\cos\varphi_1 \cdot \sin n\varphi_1 - \sin\varphi_1 \cdot \cos n\varphi_1) - G_{22} \cdot CC_1 \cdot \sin n\varphi_1 + R_{23} \cdot FC \times \\ &\times (\cos\Theta \cdot \cos\varphi_1 - \sin\Theta \sin\varphi_1) + R_{20} \cdot BC \cdot (\cos\psi \cdot \cos\varphi_1 - \sin\psi \cdot \sin\varphi_1) = 0 \end{aligned}, \quad (6)$$

где $n = 1 + R_1 / R_2$. Решая уравнение (6), определим реакцию $\vec{R}_{20}$, затем из (4), (5) определим реакции $\vec{R}_{21}^x$ и $\vec{R}_{21}^y$. На рисунке 6 представлены графики функций $\vec{R}_{21}^x(\varphi_1)$, $\vec{R}_{21}^y(\varphi_1)$ и $\vec{R}_{20}(\varphi_1)$.

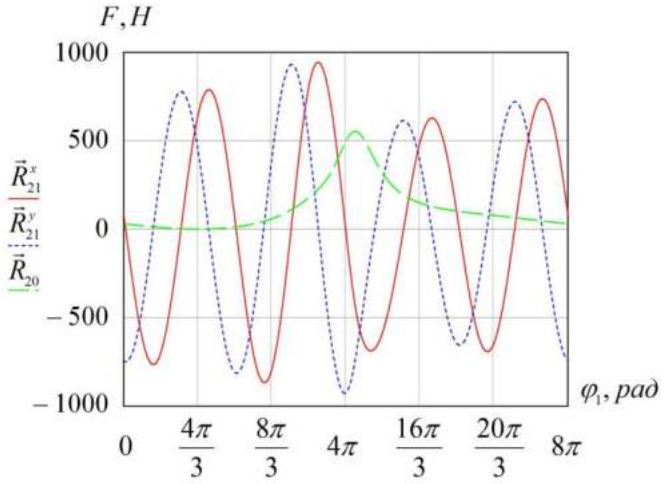


Рис. 6. Графики функций $\vec{R}_{21}^x(\varphi_1)$, $\vec{R}_{21}^y(\varphi_1)$ и $\vec{R}_{20}(\varphi_1)$

Звено 1 совершает вращательное движение и находится под действием следующих сил и моментов (рис. 7): реакция $\vec{R}_{10}$ во вращательной кинематической паре *A*, которая определяется через проекции на координатные оси; реакция $\vec{R}_{12}$ во вращательной кинематической паре *C*, которая направлена противоположно найденной реакции $\vec{R}_{21}$; силы тяжести $\vec{G}_{11}$ и $\vec{G}_{12}$; сила инерции $F_{ин1}^n$; уравновешивающий момент $\vec{M}_y$.

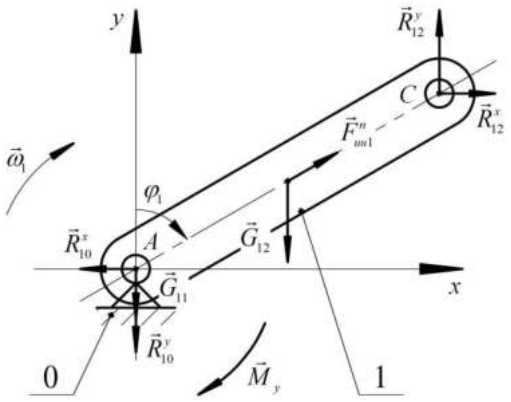


Рис. 7. Схема кинетостатического равновесия звена 1

Запишем уравнения кинетостатического равновесия звена 1:

$$R_{10}^x + R_{12}^x + F_{ин1}^n \sin\varphi_1 = 0; \quad (7)$$

$$R_{10}^y + R_{12}^y - G_1 + F_{ин1}^n \cos\varphi_1 = 0; \quad (8)$$

$$M_y - AC \cdot (R_{12}^x \cos\varphi_1 - R_{12}^y \sin\varphi_1) - G_{12} \cdot 0.5AC \cdot \sin\varphi_1 = 0. \quad (9)$$

Решая уравнения (7)-(9), получим функции $\vec{R}_{10}^x(\varphi_1)$, $\vec{R}_{10}^y(\varphi_1)$ (рис. 8) и $\vec{M}_y(\varphi_1)$ (рис. 9).

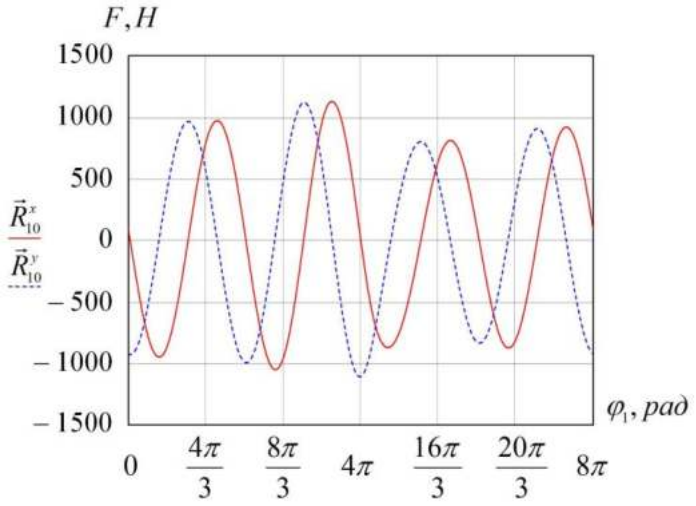


Рис. 8. Графики функций $\vec{R}_{10}^x(\varphi_1)$ и $\vec{R}_{10}^y(\varphi_1)$

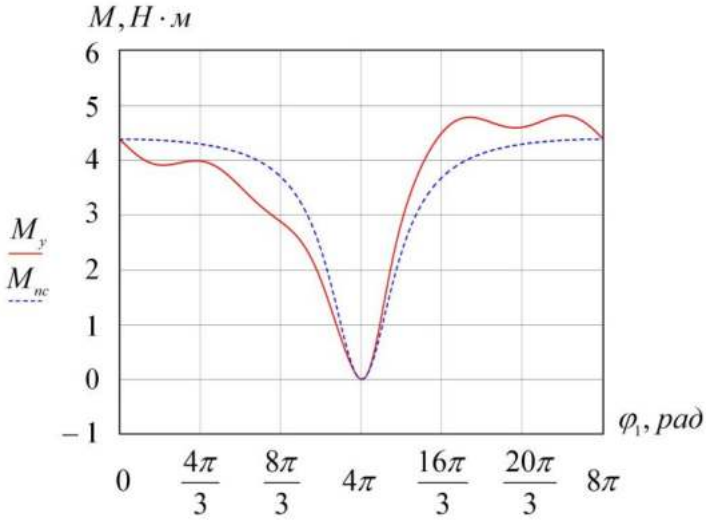


Рис. 9. Графики функций $\vec{M}_y(\varphi_1)$ и $\vec{M}_{nc}(\varphi_1)$

Анализ полученных графиков реакций в кинематических парах механизма показывает, что нагрузка на зубчатые передачи и подшипники возрастает в момент остановки выходного звена. Анализ графиков (рис. 9) уравновешивающего момента $\vec{M}_y(\varphi_1)$ и приведенного к входному валу момента сопротивления $\vec{M}_{nc}(\varphi_1)$, а также проведенные расчеты показали, что работы движущего момента и момента сил сопротивления равны. Таким образом, предложенный алгоритм силового анализа может быть использован при определении рациональных режимов работы конвейера, проектировании и расчете деталей будущей машины на прочность.

Библиографический список

1. **Тимофеев, Г.А.** Проектирование механизма прерывистого движения на базе волновой зубчатой передачи с генератором волн внутреннего деформирования / Г.А. Тимофеев, Н.Н. Барбашов, А.Н. Цибровский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 113–124.
2. **Харжевский, В.А.** Синтез рычажных механизмов с выстоем выходного звена с использованием точек распрямления пятого порядка / В.А. Харжевский // Вестник ГГТУ им П.О. Сухого. – 2016. – № 4. – С. 21–27.
3. **Lin, C.** Geometric design and kinematics analysis of coplanar double internal meshing non-circular planetary gear train / C. Lin, X. Xia, P. Li // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Т. 10. – С. 1–12.
4. Prevention of resonance oscillations in gear mechanisms using non-circular gears / O. P. Karpov [et al.] // Mechanism and Machine Theory. – 2017. – Т. 114. – С. 1–10.
5. Parametric vibrations and instabilities of an elliptical gear pair / N. Gao [et al.] // Journal of Vibration and Control. – 2020. – Т. 26. – С. 1721–1734.
6. **Prikhodko, A.A.** Structural and kinematic analysis of a stirred tank planetary drive / A.A. Prikhodko // Matec Web of Conferences. – 2018. – Т. 226. – 01012.
7. **Приходько, А.А.** Создание и исследование планетарных механизмов прерывистого движения с эллиптическими зубчатыми колесами / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2019. – № 6. – С. 77–88.
8. Linkage model and manufacturing process of shaping non-circular gears / F. Zheng, [et al.] // Mechanism and Machine Theory. – 2016. – Т. 96. – С. 192–212.
9. **Приходько, А.А.** Анализ функций положения планетарного механизма прерывистого движения с эллиптическими зубчатыми колесами / А.А. Приходько // СТИН. – 2020. – № 10. – С. 14–16.
10. **Приходько, А.А.** Силовой анализ планетарного механизма возвратно-вращательного движения с эллиптическими зубчатыми колесами / А.А. Приходько // Вестник машиностроения. – 2021. – № 2. – С. 14–18.

УДК 621.9.06-231.1 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_130

Д.А. Рудиков, канд. техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения)

СИНТЕЗ ДВУХСВЯЗАННЫХ МНОЖИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Аннотация. *В статье рассматривается принципиальная возможность создания кинематического расчёта множительных структур с двухсвязанными группами, которая гарантированно обеспечит высокую точность ряда ступенчаторегулируемого привода за счёт использования инженерных программ или таблиц, заранее рассчитанных с их помощью. Показана возможность применения универсальных таблиц при подборе высокоточных комбинаций чисел зубьев для двухсвязанных множительных групп на примере вертикального консольно-фрезерного станка мод. 6С12, у которого привод главного движения содержит двухсвязанные множительные группы, но погрешность ряда не укладывается в норматив отраслевого стандарта.*

The article discusses the principal possibility of creating a kinematic calculation of multiple structures with two-band groups, which is guaranteed to ensure the high accuracy of a number of steady-adjustable drive by using engineering programs or tables that are designed for their help. The possibility of using universal tables in the selection of high-precision

combinations of teeth numbers for two-knitted multiple groups on the example of the vertical console milling machine model 6C12, which contains two-liquid multiplinary groups, but the error of a number does not fit in the tolerance of the industry standard.

Ключевые слова: погрешность ряда, множительная структура, точность ряда, передаточное отношение, множительная группа.
Keywords: the error of the series, the multiplication structure, the accuracy of the row, gear ratio, a multiplanar group.

Вертикальный консольно-фрезерный станок с 18-ступенчатыми коробками передач мод. 6С12 выпускался давно, но он был спроектирован с помощью графоаналитического метода кинематического расчета, в связи, с чем в каждой множительной группе имеются корригированные пары, некоторые группы имеют большую погрешность передаточных отношений. Погрешность реализуемого приводом главного движения ряда по полю укладывается в норматив отраслевого стандарта [1] на пределе, а по максимальному отклонению – предел превышен почти в два раза (из-за неудачного подбора передаточного отношения постоянной передачи).

Теоретически двухсвязанные множительные структуры были исследованы А. Л. Вороновым и И. А. Гребенкиным [2]. Ими предложены оригинальные зависимости и таблицы, с помощью которых можно определить числа зубьев для двухсвязанных множительных групп, но качество структуры оценивалось только по критерию минимальных радиальных габаритов и суммы чисел зубьев, а не точностью реализации ряда (или общих передаточных отношений для каждой ступени) как того требует отраслевой стандарт. Поэтому примеры кинематического расчета до определения чисел зубьев и погрешности ряда не доводились, да и рассматривались только две группы множительной части (без постоянных передач и переборной группы для 18-ступенчатого варианта). В качестве 1-й группы использовалась только симметричная комбинация чисел зубьев (средняя пара с одинаковыми числами зубьев у ведущей и ведомой шестерен, у крайних пар одинаковые числа зубьев, но с обратным положением). Предполагался только ручной счет, поэтому коэффициенты для определения чисел зубьев задавались в одном варианте.

Целью настоящей работы являлось создание методики кинематического расчета множительных структур с двухсвязанными группами, гарантирующей высокую точность ряда и предполагающей использование ЭВМ или таблиц, заранее рассчитанных с их помощью. На первом этапе исследования необходимо было выяснить возможности универсальных таблиц [3–6] в подборе высокоточных комбинаций чисел зубьев для двухсвязанных множительных групп. В качестве прототипа был намечен вертикальный консольно-фрезерный станок мод. 6С12, у которого в приводе главного движения имеются двухсвязанных множительные группы, но погрешность ряда не укладывается в норматив отраслевого стандарта (наибольшее отклонение 5,3 %, вместо требуемого 2,6 %, а предельное поле рассеивания – 5,2 %)

Была поставлена задача с помощью универсальных таблиц подобрать такие комбинации чисел зубьев, которые обеспечивали бы поле рассеивания погрешности не выше 3 %, имели бы две связанные шестерни в 3-ступенчатых группах и не содержали бы не одной корригированной пары.

Изучение упомянутых таблиц показало, что комбинации чисел зубьев для групп структурной формулы: $18 = 3_3 \cdot 3_1 \cdot 2_9$ имеется достаточно много. Из них в ходе детального исследования были отобраны:

– 8 комбинаций для группы 2_9 с предельными значениями передаточных отношений и полем рассеивания погрешности меньше 1,2 %;

– свыше 20 комбинаций для группы 3_1 с суммой чисел зубьев, удовлетворяющих условию сцепляемости, с погрешностью в основном меньше 1,3 % (4 комбинации имели погрешность более 2 %) и двумя связанными (совмещенными) шестернями;

– 8 комбинаций для группы 3_3 с погрешностью меньше 1 %, с суммой чисел зубьев до 71 и двумя связанными шестернями, причем предпочтение отдавалось комбинациям, не исследованным ранее.

Сочетая указанные комбинации методом сплошного перебора, можно получить свыше 300 оригинальных вариантов множительной 18-ступенчатой двухсвязанной структуры. Исследования их осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе оценивалось поле рассеивания множительной части (сумма групповых полей рассеивания) и в итоге около трети вариантов с полем свыше 2 % были исключены из рассмотрения. На втором – для оставшихся вариантов рассчитывался и анализировался баланс погрешности, позволяющий детально оценить все ее составляющие. На третьем были рассмотрены несколько сочетаний с большими групповыми полями рассеивания, чтобы оценить, как велика может быть общая погрешность ряда и на сколько реально превышение норматива отраслевого стандарта (5,2 %).

Всего с помощью баланса погрешности были исследованы около 180 вариантов, один из них (с минимальной общей суммой чисел зубьев 200=48+70+82) приведён в табл. 1.

Первые два столбца таблицы содержат номера ступеней и частоту электродвигателя для каждой из них (по результатам измерений на станке с аналогичной кинематикой); следующие 4 колонки содержат числа зубьев шестерен участвующих в передаче движения на данной ступени (постоянная пара и числа зубьев из множительных групп); за ними идут три столбца содержащие частоты (предпочтительное число, геометрическое – целая степень знаменателя ряда, и рассчитанная по уравнениям кинематического баланса); следующие 5 столбцов это составляющие относительной погрешности (округления стандартного, предпочтительного числа, передаточных отношений в группах и постоянной части); последние 2 столбца – общая погрешность, определенная суммированием отдельных составляющих и по уравнениям кинематического баланса. Для каждого рассматриваемого сочетания в таблицу EXCEL вносятся числа зубьев множительных групп и примерные числа постоянной пары, остальное все определяется расчётом в EXCEL; варьируя числа зубьев постоянной пары добиваются чтобы экстремальные отклонения общей погрешности уравнялись по абсолютной величине.

В приведённом варианте баланса анализ показывает:

– экстремальные значения общей погрешности располагаются на 4 и 17 ступенях;

– поле рассеивания близко к 2 %, отклонение ±1 % хорошо сбалансировано в процессе подбора чисел зубьев постоянной пары (среднее – 0,02 %);

– передаточное отношение постоянной пары 0,33 (1:3) не выходит за пределы допустимого (до 0,25);

– погрешность передаточных отношений во второй множительной группе (1,84 %) очень велика, но хорошо компенсируется отрицательными составляющими погрешности, в связи, с чем относительная компенсация погрешности множительной части и округления достигает 55 %.

Из-за ограниченности объёма невозможно показать и проанализировать все возможные варианты. В сводную табл. 2 включены те из них, которые отличаются от рассмотренного ранее тем, что первая группа имеет асимметричную форму, а суммы чисел зубьев изменены в большую или меньшую сторону. Для сокращения объёма из каждого варианта баланса в табл. 2 включались по две строки (ступени с экстремальными значениями общей погрешности).

Таблица 1

Баланс погрешности оригинального варианта с минимальной общей суммой чисел зубьев

№ ступени	Частота двигателя	Числа зубьев шестерен								Частота вращения, об/мин			Относительная погрешность, %						
		группы								Станд.	геометр.	расчетн.	округ, станд. чисел	в группах			Постоянной сост.	общая	
																		суммированием	по уравн. кинемат. баланса
k	N_{BX}	1		3_3		3_1		2_9		Nstk	NG_k	N_{Rk}	W_{stk}	W_{2J}	W_{1J}	W_{3J}	W_{pk}	W_{sk}	W_{Bk}
1	1499,35	24	73	16	32	24	46	16	66	31,5	31,622777	31,1739221	0,388254	0	0	0,00000	-1,419402	-1,031149	-1,031149
2	1499,14					28	42			40	39,810717	39,8275799	-0,475457		1,49750		-1,43367	-0,411631	-0,433100
3	1499,00					32	38			50	50,118723	50,3039916	0,236884		1,83873		-1,442546	0,633068	0,606543
4	1499,16			24	24	24	46			63	63,095734	62,3400266	0,151729	0,237447	0		-1,431763	-1,042588	-1,045987
5	1498,96					28	42			80	79,432823	79,6459676	-0,714033		1,49750		-1,445044	-0,424134	-0,445700
6	1498,85					32	38			100	100,0000	100,597647	0,000000		1,83873		-1,452671	0,623505	0,597647
7	1498,85			32	16	24	46			125	125,89254	124,653606	0,708971	0,475457	0		-1,452671	-0,268243	-0,275150
8	1498,67					28	42			160	158,48932	159,261117	-0,953175		1,49750		-1,464112	-0,444333	-0,466203
9	1498,43					32	38			200	199,52623	201,139856	-0,237447		1,83873		-1,479826	0,596914	0,571281
10	1498,78			16	32	24	46	54	28	250	251,18864	247,905238	0,473207	0	0	0,152012	-1,456945	-0,831725	-0,833940
11	1498,53					28	42			315	316,22777	316,715389	0,388254		1,49750		-1,473251	0,564512	0,542454
12	1498,17					32	38			400	398,10717	399,964902	-0,475457		1,83873		-1,497052	0,018233	-0,008816
13	1498,10			24	24	24	46			500	501,18723	495,585195	0,236884	0,237447	0		-1,50172	-0,875376	-0,880869
14	1497,48					28	42			630	630,95734	632,983562	0,151729		1,49750		-1,542813	0,495872	0,472863
15	1496,54					32	38			800	794,32823	799,059485	-0,714033		1,83873		-1,604222	-0,090067	-0,118404
16	1495,62			32	16	24	46			1000	1000	989,532224	0,000000	0,475457	0		-1,664514	-1,037044	-1,046778
17	1493,33					28	42			1250	1258,9254	1262,45871	0,708971		1,49750		-1,81567	1,018267	0,989630
18	1491,11					32	38			1600	1584,8932	1592,32361	-0,953175		1,83873		-1,961041	-0,448017	-0,484347
												W_{sk}	W_{Bk}				**max**	1,018267	0,989630
											поле	2,060854	2,036408				**min**	-1,042588	-1,046778

Таблица 2

Характеристики двухсвязанных оригинальных вариантов 18-ступенчатой множительной структуры

№ сектора	№ ступени	Частота двигателя	Числа зубьев шестерён								Частота вращения, об/мин			Относительная погрешность, %							
			группы								станд.	геометр.	расчетн.	округ, станд. чисел	в группах			постоянной сост.	общая		
																			суммированием	по уравн. кинемат. баланса	поле
	k	N_{BX}	1		3_3		3_1		2_9		N_{stk}	N_{Gk}	N_{Rk}	W_{stk}	W_{1J}	W_{2J}	W_{3J}	W_{pk}	W_{sk}	W_{Bk}	C
1	17	1493,33	20	55	40	20	35	59	57	29	1250	1258.9254	1266,3230	0.70897	0,47546	0,52516	0.43314	-0,84086	1,30084	1,29659	2,62868
	18	1491,11			40	20	40	54			1600	1584.8932	1578,8877	-0.95318		-0,29316		-0,98767	-1,32855	-1,33209	
	17	1493,33	20	54	40	20	35	59	54	28	1250	1258.9254	1265,5296	0.70897	0,47546	0,52516	0.15201	-0,62483	1,23733	1,23357	2,62809
	18	1491,11			40	20	40	54			1600	1584.8932	1577,8984	-0.95318		-0,29316		-0,77196	-1,39035	-1,39452	
2	13	1498,10	29	91	27	38	38	50	57	29	500	501.18723	506,7199	0.23688	0,54778	0,00000	0.43311	0,11946	1,34342	1,34081	2,76596
	18	1491,11			38	27	48	40			1600	1584.8932	1577,4129	-0.95318	-0,18124	-0,37516		-0,34742	-1,42067	-1,42515	
	13	1498,10	26	80	27	38	38	50	54	28	500	501.18723	507,0533	0.23688	0,54778	0,00000	0.15201	0,46655	1,41009	1,40733	2,76700
	18	1491,11			38	27	48	40			1600	1584.8932	1578,4507	-0.95318	-0,18124	-0,37516		-0,00195	-1,35580	-1,35967	
3	5	1498,96	21	74	26	44	49	39	18	72	80	79.43282	78,9533	-0.71403	-0,04732	-0,19998	0.00000	-0,35754	-1,31338	-1,31770	2,47368
	17	1493,33			38	32	49	39	60	30	1250	1258.9254	1264,5529	0.70897	0,67170	-0,19998	0,71403	-0,73226	1,15922	1,15598	
	5	1498,96	22	76	26	44	49	39	17	69	80	79.43282	79,3691	-0.71403	-0,04732	-0,19998	0,00000	0,16725	-0,79363	-0,79420	2,33544
	7	1498,85			38	32	44	44			125	125.8925	126,9403	0.70897	0,67170	0,00000		0,15950	1,54714	1,54124	
	5	1498,96	24	82	26	44	49	39	16	66	80	79.43282	78,9616	-0.71403	-0,04732	-0,19998	0,00000	-0,34702	-1,30297	-1,30721	2,33076
	7	1498,85			38	32	44	44			125	125.8925	126,2886	0.70897	0,67170	0,00000		-0,35473	1,02580	1,02355	
	5	1498,96	23	79	26	44	49	40	18	72	80	79.43282	78,9747	-0.71403	-0,04732	-0,48331	0,00000	0,04655	-1,28662	-1,29074	2,61675
	7	1498,85			38	32	44	45			125	125.8925	126,6694	0.70897	0,67170	0,00000		-0,05429	1,33039	1,32601	
4	10	1498,78	17	58	16	55	45	44	64	33	250	251.1886	253,4792	0.47321	0,00000	0,00000	0,23215	0,67815	1,38939	1,38508	2,71717
	18	1491,11			38	33	55	34			1600	1584.8932	1578,8878	-0.95318	-0,57116	-0,20152		0,16313	-1,32850	-1,33209	
	10	1498,78	18	61	16	55	45	44	54	28	250	251.1886	253,7662	0.47321	0,00000	0,00000	0,15201	0,87279	1,50418	1,49934	2,71864
	18	1491,11			38	33	55	34			1600	1584.8932	1580,6753	-0.95318	-0,57116	-0,20152		0,35677	-1,21679	-1,21930	
5	4	1499,16	24	73	24	24	24	46	16	66	63	63.09573	62,34003	0.15117	0,23745	0,00000	0,00000	-1,043176	-1,04259	-1,04590	2,03641
	17	1493,33			32	16	28	42	54	28	1250	1258.9254	1262,45874	0.70897	0,47545	1,49750	0,15201	-1,81567	1,01827	0,98963	
	17	1493,33	21	61	32	16	28	44	54	28	1250	1258.9254	1261,87075	0.70897	0,47546	1,09632	0,15201	-1,47196	0,96080	0,94293	1,95227
	18	1491,11					32	40			1600	1584.8932	1584,00307	-0.95318		0,95318		-1,61784	-0,99037	-1,00934	
	17	1493,33	25	74	32	16	28	44	57	29	1250	1258.9254	1262,04498	0.70897	0,47546	1,09632	0,43314	-1,73418	0,97970	0,95677	1,95231
	18	1491,11					32	40			1600	1584.8932	1584,22177	-0.95318		0,95318		-1,87968	-0,97108	-0,99554	

Анализ табл. 2 показывает, что варианты с симметричной первой группой могут реализовываться при большей сумме чисел, чем в рассмотренных ранее [2], то есть отличающиеся от 48. В частности, в секторе 1 таблицы приведены два варианта с суммой чисел зубьев у первой группы равной 60. Сумма чисел зубьев второй группы тоже может отличатся от рассчитанной по коэффициентам рассмотренного ранее варианта (92) и в большую, и в меньшую сторону. Рассматриваемые варианты имеют сумму равную 94. Отличаются они между собой только суммой чисел зубьев третьей группы (86 и 82). Оба обеспечивают погрешность 2,63 % по полю рассеивания. Передаточные отношения постоянной пары меньше 0,33, и отличаются одним зубом у ведомой шестерни.

Во втором секторе представлены два варианта с асимметричной первой группой и суммой чисел зубьев большей 60. Различаются варианты между собой только суммой чисел зубьев последней группы. Погрешность реализации ряда 2,77 %. Передаточное отношение постоянной пары менее 0,33.

В секторе 3 приведены 4 варианта образованные с участием асимметричной первой группы, имеющей в первой паре передаточное отношение значительно меньшее 0,5. Все варианты, отличающиеся друг от друга суммами чисел зубьев третьей пары, имеют общую погрешность ряда меньше 3% и передаточное отношение постоянной пары близкое к 0,29.

Варианты, расположенные в 4 секторе, имеют ещё меньшее передаточное отношение в первой паре асимметричной группы, чуть большую сумму чисел зубьев в первой и второй группе и различаются суммой чисел зубьев последней группы. Погрешность - меньше 3 %.

Особенно интересные варианты представлены в секторе 5. У них первая группа симметричная, с минимальной суммой чисел зубьев (48), но числа зубьев второй группы имеют суммы и коэффициенты, отличающиеся от рекомендованных ранее [2]. Все три варианта показали наивысшую точность реализации ряда меньше 2 % по полю рассеивания. Передаточные отношения постоянной пары близки к 0,33.

Из всех 180 рассмотренных вариантов больше 4 % погрешность реализации ряда была у 50, больше 50 вариантов имели погрешность 3–4 %, около 70 вариантов имели погрешность меньше 3%. Норматив отраслевого стандарта на поле рассеивания (5,2 %) не был превышен ни у одного варианта.

Учитывая изложенное, можно сделать следующие выводы:

– универсальные таблицы предоставляют конструктору практически неограниченные возможности в синтезе двухсвязанных 18-ступенчатых множительных структур с нормальными (не корригированными) шестернями;

– доказана принципиальна возможность использования комбинаций чисел зубьев для двухсвязанных множительных групп отличающихся от рекомендованных [2], как по коэффициентам, так и по сумме чисел зубьев.

Библиографический список

1 ГОСТ 8032-84 (СТ СЭВ 3961-83). Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел. (Preferred numbers and series of preferred numbers) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200009578.

2 **Воронов, А.Л.** Коробки передач металлорежущих станков / А.Л. Воронов, И. А. Гребенкин // М.: Машиностроение, 1964 г. 136 с.

3 **Заверняев, Б.Г.** Таблицы универсальные для подбора чисел зубьев в коробках передач и рекомендации по их использованию: учебное пособие / Б.Г. Заверняев, Э.В. Курис // – Ростов-на-Дону, ДГТУ, 1993. – 168с.

4 **Заверняев, Б. Г.** Таблицы и методы для кинематического расчета коробок передач с малым знаменателем ряда / Б.Г. Заверняев // – Ростов н/Д: ЛаПО, 2001. – 222 с.

5 **Рудиков, Д.А.** Совершенствование кинематических расчетов коробок передач металлорежущих станков / Д.А. Рудиков // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т.10. № 2(45). С. 224-228.

6 **Рудиков, Д.А.** Совершенствование методов кинематического расчета привода главного движения металлорежущих станков по критерию минимизации погрешности ряда [текст]: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Д.А. Рудиков // Ростов н/Д, 2006. – 209 с.

УДК 620.618.6 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_136

А.А. Свечников, канд. техн. наук (Самарский государственный университет путей сообщения)

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ В ТРАНСПОРТНЫХ МАШИНАХ

Аннотация. *В статье представлены актуальные направления снижения вибрации в транспортных машинах. Обоснована актуальность подавления вибрации в транспортной технике. Рассмотрены варианты снижения вибрации соответствующие современному развитию техники. Рассмотрен активный способ управления амплитудно-частотными характеристиками вращающихся деталей. Представлены разработки конструктивного исполнения виброгасителей изготовленного из волокнового проволочного материала.*

Presents current trends in vibration reduction in transport vehicles. The urgency of vibration suppression in transport equipment has been substantiated. Vibration reduction options are considered corresponding to modern technology development. An active method of controlling the amplitude-frequency characteristics of rotating parts is considered. The development of the structural design of vibration dampers made of fiber wire material is presented.

Ключевые слова: взаимовлияние вибраций и силовых факторов, вибрационные характеристики, ротор, волокновый проволочный материал (МР), виброизолятор.
Keywords: mutual influence of vibrations and force factors, vibration characteristics, rotor, fiber wire material (MR), vibration isolator.

Современная экономическая ситуация предполагает повышение производительности труда для осуществления устойчивого экономического роста. В свою очередь повышение производительности труда немыслимо без повышения мощности технологического и транспортного оборудования. При этом форсирование энергетических установок в сложных эксплуатационных условиях неминуемо приводит к возрастанию вибрационных нагрузок на детали и узлы техники. Статистические данные об отказах технологических машин говорят о том, что больше половины их происходит вследствие усталостных разрушений вызванными вибрационными нагрузками. Поэтому снижение вибрационного воздействия на детали и узлы транспортной техники остается актуальным направлением научных разработок.

Применение современных способов подавления вибрации, а также управления амплитудно-частотными характеристиками узлов можно существенно повысить ресурс транспортной и технологической машины или же увеличить мощность энергетических установок этих машин. Данное обстоятельство приведет к получению экономического эффекта и росту производительности труда.

Существующая система подавления вибраций весьма разнообразна и представлена резиновыми, резинометалическими элементами, системами подавления вибрации основными элементами которой являются вибрационных гасителей гидравлического или пневматического действия. При этом широко известны недостатки существующих систем

подавление вибраций. К примеру, резина очень чувствительна к агрессивной внешней среде и, при этом, имеет малую прочность. Система подавления вибрации в основном нацелена на гашение колебаний и вибраций путем перевода энергии вибрации в тепловую энергию. Системы с активным управлением характеристик механических систем практически не эксплуатируются. А ведь известно, что «болезнь» гораздо выгоднее предупредить, чем потом её лечить. Поэтому разработка систем виброзащиты, построенной на активном управлении частотными характеристиками вращающихся деталей представляется чрезвычайно актуальной.

Создание систем активного управления амплитудно-частотными характеристиками вращающихся деталей основана на гипотезе, что колебания в одной плоскости (например, радиальной) зависят от усилий, приложенных в другом направлении (например осевом).

На основе точных решений модельных задач для упругих систем выявлено что, существование согласованных концевых гасителей различных видов колебаний, не дающих отраженных возмущений в системе, позволяет рассматривать модель стержня без учета граничных условий, а вибрации, распространяющиеся по стержню рассматривать как упругие волны. Здесь и далее предполагаем, что стержень является бесконечным. Такая идеализация допустима, если на границах находятся оптимальные демпфирующие устройства, т.е. параметры граничного закрепления таковы, что падающие на него возмущения несущественны.

Для идеализированной математической модели, описывающей продольные и крутильные волны конечной амплитуды, распространяющиеся в стрежне:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\alpha}{\rho}R^2\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 + \frac{2\lambda}{\rho}\theta^2\right],\\ \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_\tau^2\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{2\lambda}{\rho}\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) - \frac{2\lambda F}{\rho J_\rho}\theta\frac{\partial u}{\partial x}.\end{aligned} \tag{1}$$

где u(x, t) – продольные перемещение частиц срединной линии;

$\theta(x,t)$ - угол поворота поперечного сечения в своей плоскости;

ρ – плотность материала;

F – площадь поперечного сечения стержня;

J_ρ – полярный момент инерции;

$R = \sqrt{J_\rho/F}$ – полярный радиус инерции;

$c_0 = \sqrt{F/\rho}$ - скорость, с которой распространялась бы продольная волна при отсутствии крутильных возмущений;

$c_\tau = \sqrt{\mu/\rho}$ - скорость, с которой распространялась бы продольная волна при отсутствии продольных возмущений;

$E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu)$ - коэффициент, характеризующий физическую нелинейность;

λ, μ – константы Ляме второго порядка;

ν_2, ν_3 – константы Ляме третьего порядка.

Заметим, что нелинейные слагаемые входят в уравнение (1) нессиметрично: продольные волны воздействуют на крутильные параметрическим образом, а крутильные волны служат источником продольных волн.

Также в работа [5,6] исследовано взаимовлияние поперечных, продольных и крутильных волн и колебаний в музыкальных инструментах.

В работе [5] исследуется линеаризованное уравнения поперечно-продольных колебаний гибкой предварительно натянутой струны:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \beta^2 \frac{\partial^2 y}{\partial s^2};\ \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{1}{2(1+l_0)^2}\left(\frac{\partial y}{\partial s}\right)^2\right]$$

Первое уравнение представляет собой традиционное уравнение поперечных колебаний. Второе уравнение – уравнение продольных колебаний. Это уравнение неоднородно, наличие в нем члена $a^2 \frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{1}{2(1+l_0)^2}\left(\frac{\partial y}{\partial s}\right)^2\right]$ говорит, что роль вынуждающей силы для продольных колебаний играют поперечные составляющие и т.д.

В работе [6] задачи о колебаниях струны рассмотрены с меньшими упрощениями и допущениями. Тем не менее, автором выявлено, что в предварительно напряженных телах различной геометрии существуют вынужденные продольные колебания на частотах поперечных и крутильных колебаний. Определено, что вклад продольных составляющих в динамическое нагружение растянутых струн оказывается одного порядка с вкладом поперечных колебаний и др.

Таким образом, на базе проведенных исследований и анализа опубликованных работ, можно сделать вполне мотивированное заключение о значительности взаимовлияния поперечных, продольных и крутильных колебаний в достаточно простых (струны, стержни, пластины и т.д.) механических системах. Причем аналитическое решение задач даже с учетом существующих упрощений достаточно сложно. Задача еще более усложняется для современных многокомпонентных роторов. Представляется, что единственно возможный путь исследование для таких сложных механических систем эмпирический, включающий создание стенда для экспериментальных исследований натурных или модельных роторов с имитацией возбуждения в предварительно напряженных телах комбинации волновой нагрузки различного направления с фиксацией комплексной амплитудно-частотной характеристики АЧХ системы, испытания на этом стенде натурных или модельных объектов с их нагружением различными комбинациями волновой нагрузками, анализ и обобщение полученных результатов.

Расчетные исследования для модельного ротора дают основание сделать заключение о значительности влияния продольной растягивающей нагрузки на АЧХ ротора (рис. 1).

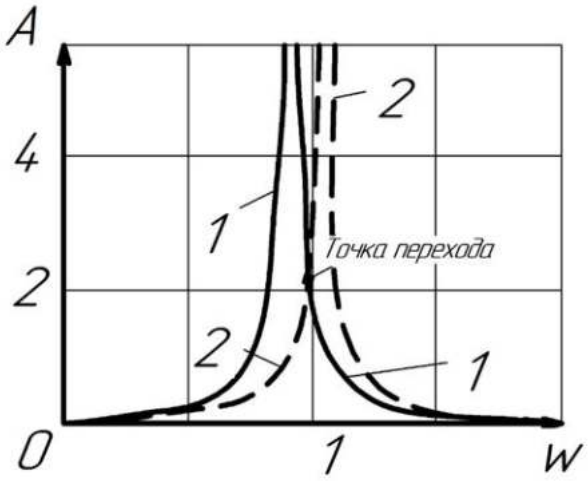


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика ротора

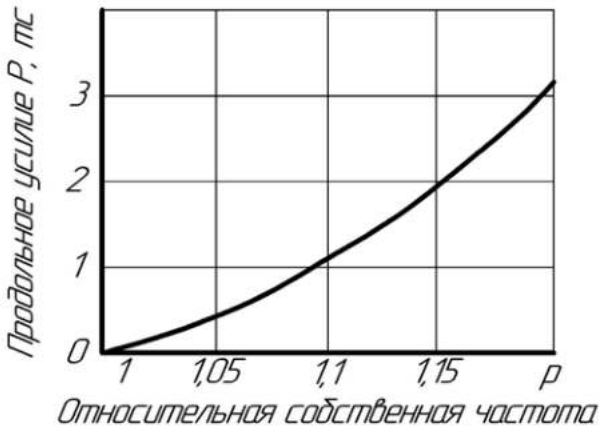


Рис. 2. Зависимость частоты от продольной силы

При изменении продольной нагрузки 0…3 тс (рис. 2) собственная частота ротора изменилась на 20 %.

Наиболее универсальным с точки зрения решения всего комплекса поставленных задач является стенд исследования колебаний ротора (рис.3), создаваемый в даный момент в

лаборатории кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» Самарского государственного университета путей сообщения.

Стенд включает испытуемый ротор 1, установленный в опорах 2, на котором установлен диск 3 с турбинными лопатками 4 и резьбовыми отверстиями 5, предназначенными для установки грузов, задающих дисбаланс ротора, а также приводной ротор 6, установленный в опорах 7, приводимый во вращение электрическим двигателем асинхронного типа 8 через сильфонную муфту 9. На роторе 6 установлен диск 10 с отверстиями 11, через которые на турбинные лопатки 4 диска 3 воздействует бегущая волна, возбуждаемая сжатым воздухом, подаваемым через сопловые аппараты 12 и окна 11 на турбинные лопатки 4.

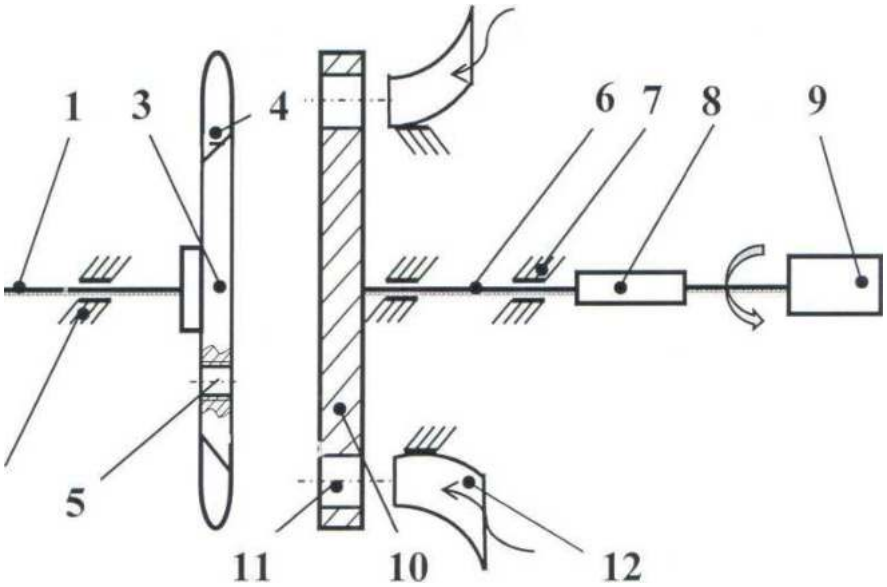


Рис.3. Принципиальная схема стенда

Стенд работает следующим образом. Ротор 6 приводится во вращение электродвигателем 9. При этом через сопловые отверстия 12 от внешнего источника сжатого воздуха подается струя, возбуждающая бегущую волну на лопатках турбины 4 через вращающиеся окна 11 диска 10. За счет того, что угол сдвига между окнами 11 диска 10 определяется зависимостью.

$$\alpha = \frac{360^0 * n}{m} * \left(1 - \frac{1}{m}\right),$$

где m - число окон 11 в диске 10;

n - передковый номер окна 11, а число сопловых аппаратов 12 равно числу окон 1 1 на турбинных лопатках 4 диска 3 ротора 1 возникает бегущая волна с частотой возбуждения

$$f = (k \pm P)m,$$

где к - число оборотов ротора 1;

P - число оборотов ротора 6;

m - число отверстий 11 в модулирующем диске 10.

Путем установки в резьбовые отверстия 5 диска 3 грузиков задают дисбаланс ротора 1, возбуждая тем самым радиальные колебания ротора 1. Путем изменения частоты вращения ротора 6 и давления сжатого воздуха, подаваемого через сопла 12 раскручивают ротор 1 до заданных оборотов. При этом за счет бегущей волны возбуждают крутильные колебания ротора 1, а за счет прерывистости подачи сжатого воздуха на турбинные лопатки 4 создают осевые колебания ротора 1.

Изменяя величину или частоту возбуждающей нагрузки одной из вибраций фиксируют степень ее влияния на вибрации других направлений. Таким образом исследуют взаимное влияние вибраций.

При недостаточном силовом воздействии сжатого воздуха на турбинные лопатки 4 ротор 1 можно раскрутить от дополнительного приводного электродвигателя через, например, сильфонную муфту.

Использование предложенного технического решения, например, при доводке энергетических установок транспортных систем, дает возможность уменьшить интенсивность вибрационной нагрузки на агрегаты и системы энергетической установки, избежать возникновения дополнительных резонансов, расширения зон неустойчивой работы энергетической установки и т.п. и тем самым повысить ее качество, существенно увеличить ресурс, привести в соответствие санитарным нормам по уровню вибрации рабочее место человека-оператора (машиниста), тем самым существенно улучшить условия его работы и избежать аварийных ситуаций, причиной которых является человеческий фактор и др.

Наравне с разработкой активных систем управления амплитудно-частотными характеристиками вращающихся масс на кафедре «Наземные транспортно-технологические средства» разрабатываются пассивные методы виброгашения на основе материла МР (металлорезина).

Авторами в целях управление упруго-демпфирующей способностью и прочностью виброизоляторов предлагается универсальный способ армирования упруго-демпфирущего элемента (УДЭ), выгодно отличающийся от известных широкими возможностями управления прочностными и демпфирующими характеристиками. Это достигается с помощью включения в массив материала МР высокопрочного армирующего элемента (АЭ), изготовляемого из специального проволочного жгута.

Особенности технологии изготовления армированных УДЭ во многом определяются их формой и характером нагружения. Так, например, армирование УДЭ колоколообразной формы виброизоляторов двойной колокольчик (ДК) осуществляется АЭ сложной колоколообразной формы, заключаемым между массивами проволочных спиралей. Эта модификация виброизоляторов получила название «двойной колокольчик усиленный» ДКУ (рис. 4).

Рис. 4. Виброизолятор типа ДКУ

Авторский коллектив СамГУПС обладает 15 патентами различных конструкций виброизоляторов и 4 патентами на способ изготовления нетканого проволочного материала МР.

Разработанные из волокнового проволочного материала МР виброизоляторы ДКУ с повышенными грузоподъемностью, упругодемпфирующими и прочностными свойствами обеспечивают высокую эффективность их применения в системах виброзащиты агрегатов и узлов ТС, предназначенных для эксплуатации в самых сложных условиях.

Проведенные эксперименты и теоретические исследования основных свойств виброизоляторов из МР и динамических характеристик систем виброзащиты ЭУ и ТС позволили создать основы проектирования виброизоляторов ДКУ и их модификаций с оптимальными габаритами и весовыми характеристиками.

Представленные направления развития систем подавления вибрации имеют широкий спектр применения как для защиты энергетических установок от нежелательных режимов работы, так и для защиты ответственного измерительного оборудования и человека от вредного воздействия вибрационной нагрузки.

Библиографический список

1. Инновационные технические решения по совершенствованию конструктивных и технологических параметров виброизоляторов с Удэ из материала МР для объектов железнодорожного транспорта / Г. В. Лазуткин [и др.] // Вестник СамГУПС. – 2017. – № 2(36). – С. 82-93.

2. **Антипов, В.А.** Подавление вибрации агрегатов и узлов транспортных систем / В.А. Антипов // Монография. – М.: Маршрут, 2006. – 264 с.

3. **Патент № 2244039 РФ, МПК7 С2С 49/24.** Способ изготовления упругопористого нетканого проволочного материала и изделий из него / В.А. Антипов [и др.]. - Опубл. 27.01.2005. Бюл. № 1

4. Стенд для исследования взаимовлияния вибраций и силовых факторов различного направления на вибрационные характеристики модельных роторов турбомашин / В.А. Антипов [и др.] // Вестник СамГУПС. – 2016. – № 2(32). – С. 115-120.

5. Демьянов, Ю.А. Взаимовлияние поперечных, продольных и крутильных волн и колебаний в музыкальных инструментах. XXIV сессия Российского акустического общества, сессия научного совета по акустике РАН. / Ю.А. Демьянов, А.А. Малашин // МГУЛ., г. Мытищи, Московская обл., Россия, с. 59-63.

6. **Малашин, А.А.** Взаимовлияние волновых и колебательных процессов в предварительно напряженных элементах и системах / А.А. Малашин // Автореферат дисс. на соискание уч. степ. докт. физико-матем. наук. – Москва; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. 2011 г. 35 с.

УДК 621.313.13 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_141

В.В. Сироткин, Д.А. Пигалев, М.Ю. Колмыкова (Ростовский государственный университет путей сообщения)

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В КРАЙНИХ ВИТКАХ ОБМОТКИ СТАТОРА ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация. *В статье описаны преимущества и недостатки вентильно-индукторного двигателя, причины возникновения дополнительных потерь. Приведено краткое описание этапов построения полноразмерной компьютерной модели в программном пакете «COMSOL Multiphysics». Представлено распределение магнитного поля двигателя вентильно-индукторного типа, составлен алгоритм определения дополнительных потерь.*

The study describes the advantages and disadvantages of the switched reluctance motor, the reasons of supplementary losses. The full-scale model identification summary in "COMSOL Multiphysics" is given. A the result the magnetic field pattern of the switched reluctance motor and strategy for calculation of supplementary losses are presented.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, скин-эффект, компьютерное моделирование, дополнительные потери.
Keywords: switched reluctance motor, skin-effect, computer modeling, supplementary losses.

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) находят применение во многих сферах деятельности человека (отраслях промышленности). ВИД обладает рядом преимуществ по сравнению с другими широко применяемыми в настоящее время типами электродвигателей [1]:

1) высоким коэффициентом полезного действия (выше, чем у асинхронной машины на 2–5 %);

2) высоким пусковым моментом;

3) широким диапазоном рабочих частот вращения;

4) высокими показателями надежности, которые достигаются за счет отсутствия обмотки на роторе, коллекторно-щеточного узла и контактных колец.

Однако существуют и некоторые недостатки [2]:

1) повышенный уровень шума и вибрации (эти обстоятельства препятствуют повсеместному применению ВИД);

2) вследствие вибраций, действующих на корпус ВИД, происходит ускоренный износ подшипниковых узлов (ПУ), что ведет к остановке двигателя и потерям производительности;

Постоянно увеличивающийся рост публикаций по теме ВИД свидетельствует об актуальности использования данного типа двигателей. Однако до сих пор существует ряд задач, решение которых с использованием современного программного обеспечения улучшит показатели ВИД.

Одной из таких задач является определение дополнительных потерь, вызванных вихревыми токами (токами Фуко). Также немаловажным фактором при уточнении количественных значений этих потерь является наличие скин-эффекта в медных проводниках. Физическая картина возникновения данного эффекта представлена на рис. 1.

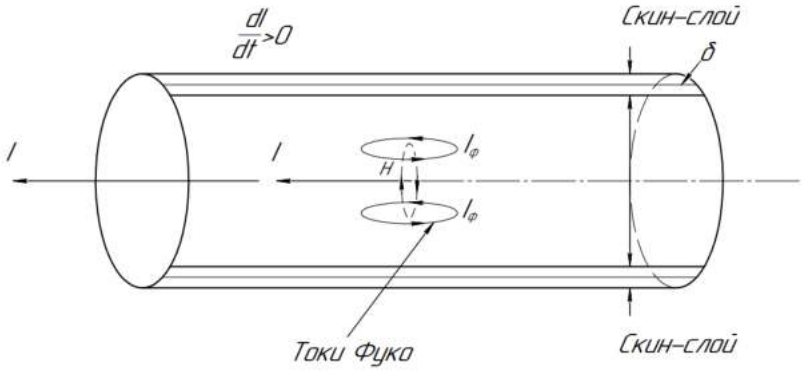


Рис. 1. Физическая картина возникновения скин-эффекта

Вектор напряженности индукционного поля в области, расположенной у поверхности проводника, направлен в сторону первичного тока (в сторону вектора напряженности электрического поля), а в области вблизи оси – в сторону, противоположную протеканию первичного тока (вектора напряженности электрического поля). Таким образом, плотность тока у поверхности проводника возрастает.

Таким образом, наибольший интерес представляют дополнительные потери, определение которых является одной из перспективных задач при изучении ВИД средней и большой мощности (тяговых ВИД) [3].

Главной задачей является определение оптимального расстояния от крайних медных витков статора до воздушного зазора с учетом геометрических размеров обмоток, которые заданы ГОСТом [4]. Это направление исследования ВИД является актуальным из-за частого

подгорания изоляции крайних витков, приводящего к выходу двигателя из строя. При изучении данного вопроса и поиска возможных путей решения было выбрано компьютерное моделирование с помощью метода конечных элементов, точность результатов которого сопоставима с физическим экспериментом.

В отличие от компьютерной модели, построенной в [5], в ходе проведенных исследований была разработана полноразмерная компьютерная модель ВИД в программном пакете (ПП) «COMSOL Multiphysics» [6, 7]. В нем были заданы 1) значения параметров модели (рис. 2); 2) определены основные физические свойства; 3) заданы граничные условия; 4) подобран шаг сетки конечных элементов и 5) выбраны оптимальные параметры «решателя» для построения компьютерной модели (рис. 3).

Parameters

Name	Expression	Value	Description
R4	297.18[mm]	0.29718 m	
L1	63[mm]	0.063 m	
d1	73[mm]	0.073 m	
n2	12	12	
L2	60.39[mm]	0.06039 m	
d2	25.2[mm]	0.0252 m	
L3	55.5[mm]	0.0555 m	
d3	25.1[mm]	0.0251 m	
R1	120[mm]	0.12 m	
R2	188[mm]	0.188 m	
L	53[mm]	0.053 m	
d	72.8[mm]	0.0728 m	
n1	8	8	
R5	365[mm]	0.365 m	
n3	2	2	

Рис. 2. Значения параметров модели

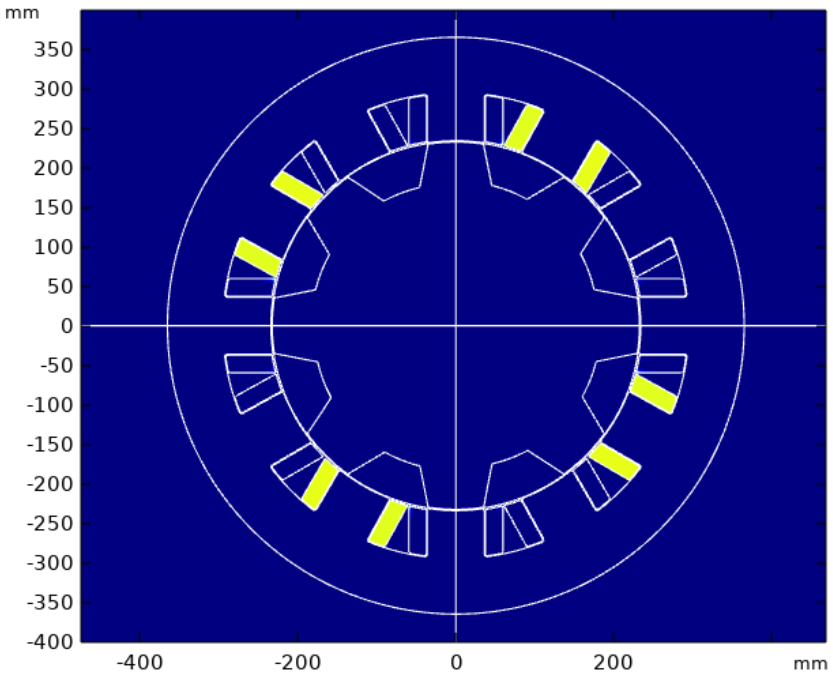


Рис. 3. Полноразмерная геометрия ВИД, построенная в ПП «COMSOL Multiphysics»

На рис. 4, показано распределение магнитного поля в ВИД, на рис. 5 – детальное отображение замыкания силовых линий при отключении фазы *B* и включении фазы *A*.

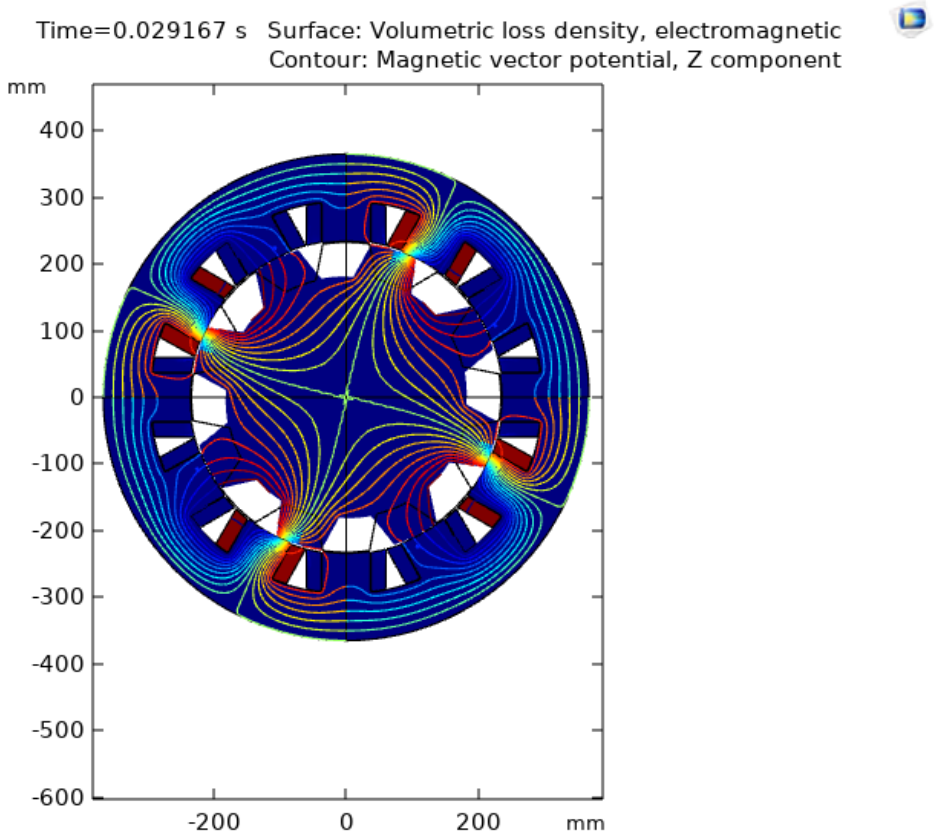


Рис. 4. Распределение магнитного поля в ВИД

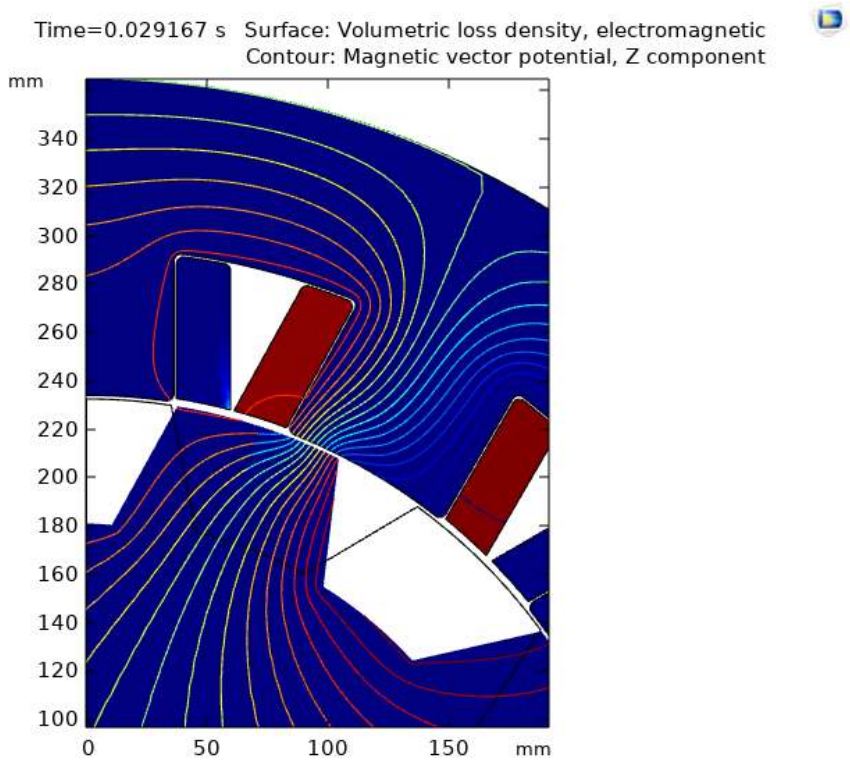


Рис. 5. Детальное отображение силовых магнитных линий при отключении фазы *B* и включении фазы *A*

Для корректного определения количественных значений дополнительных потерь необходимо провести ряд предварительных исследований и изучить физические процессы при работе ВИД. Из-за сложностей расчета дополнительных потерь был составлен следующий алгоритм: 1) определение причин, вызывающих дополнительные потери, описание физических процессов влияющих на расчет потерь, выявление нарушений в работе ЭМ, вызванных значительными количественными показателями данных потерь; 2) определение основных потерь (электрические потери в обмотках и магнитные потери в стали); 3) выбор способа определения дополнительных потерь (в том числе эмпирический способ).

Выводы и перспективы дальнейших исследований

После завершения тестовых расчетов в ПП «COMSOL Multiphysics» будут определены потери на любых участках обмоток статора. При изучении вопроса дополнительных потерь наиболее важным участком являются крайние витки, поскольку именно они подвержены наиболее сильному влиянию магнитного поля (рис. 6). В этих крайних витках выделяются значительные (для тяговых машин) дополнительные потери. Зная их конкретные значения, а также зная картину распределения температур по всей обмотке, можно выбрать расстояние крайних обмоток до воздушного зазора (при котором значения потерь будут минимальны), учитывая при этом геометрические размеры медных проводов по ГОСТу [4].

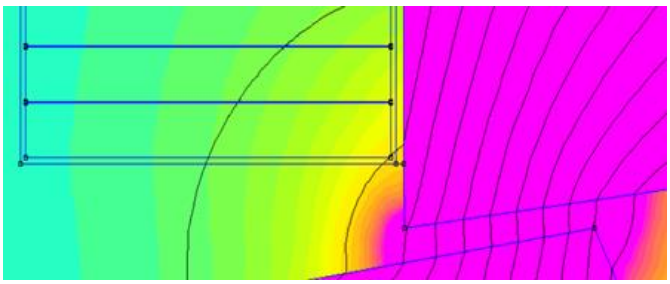


Рис. 6. Влияние магнитной индукции на медные обмотки статора в зависимости от расстояния до воздушного зазора

Библиографический список

1. Тяговые электрические машины: учебник / В. Г. Щербаков [и др.] / Под редакцией В. Г. Щербакова, А. Д. Петрушина. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016 – 641 с.

2. **Miller, T.** Switched Reluctance Motors And Their Control / T. Miller // Oxford: Magna Physics, 1993 – 205 p.

3. **Пахомин, С.А.** К расчёту добавочных потерь в тяговом индукторном двигателе / С. А. Пахомин [и др.]// Известие вузов. Электромеханика. − 2010 − № 5. − С. 39–42.

4. ГОСТ 26615-85. Провода обмоточные с эмалевой изоляцией. Общие технические условия [Электронный ресурс]. − Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200012008 (дата обращения 06.11.2021).

5. **Пигалев, Д. А.** Определение дополнительных потерь в обмотках вентильно-индукторных машин / Д. А. Пигалев, В. В. Сироткин, С. С. Черняев // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2020»). Т. 2 Технические науки. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020 − С. 159−162.

6. Сайт компании «COMSOL» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.comsol.ru (дата обращения 09.11.2021).

7. **Шабанов, А. С.** Применение пакетов программ FEMM и COMSOL Multiphysics в задачах расчёта линейных электромагнитных двигателей / А. С. Шабанов, В. Ю. Нейман // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. − № 5 (13). − С. 96−100.

УДК 517.977 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_146

Н.Н. Субботина, член-корреспондент РАН, **Е.А. Крупенников (**Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина**)**

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВАРИАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Аннотация. *Предложен новый подход к решению задачи идентификации параметров динамических систем. На основании этого подхода разработан эффективный численный алгоритм. Новый подход позволяет идентифицировать нестационарные параметры со скользящими режимами на основании наблюдений за движением системы в реальном времени.*

A new approach to solving the problem of parameters identification for dynamical systems is proposed. An efficient numerical algorithm has been developed based on this approach. The new approach makes it possible to identify non-stationary parameters with sliding modes based on observations of the system's motion in real time.

Ключевые слова: динамические системы, идентификация параметров, обратные задачи, скользящий режим
Keywords: dynamical systems, parameter identification, inverse problems, sliding mode

Решение теоретических и практических задач для динамических процессов часто приводит к необходимости идентификации и анализа неизвестных параметров рассматриваемых динамических систем. Таких, например, как коэффициенты жесткости пружинных маятников, скорости распада радиоактивных продуктов, скорости роста популяций и т.д. Информацией, на основании которой нужно решать задачи идентификации, являются выходные данные – неточные замеры фазовых состояний рассматриваемых динамических систем. В частности, для упомянутых выше примеров: для пружинного маятника – замеры величины смещения грузика относительно положения равновесия, замеры числа атомов радиоактивного вещества в образце, замеры численности популяции и т.д. Задачи идентификации являются обратными задачами динамики, так как неизвестные параметры можно рассматривать как входы в моделях динамических процессов.

К настоящему времени разработано достаточно много методов решения задач идентификации. Так, развитию классического подхода к решению задач идентификации, основанного на использовании метода наименьших квадратов, посвящена работа [1]. Решение задач идентификации с помощью анализа отклика (поведения модели в ответ на управления специального вида) рассмотрено в [2]. В работе [3] получено решение задачи идентификации нагрузок с помощью регуляризированной функции фильтрации. Авторы работы [4] рассматривают итерационные методы, не использующие обращение матриц, но применяющие обобщенную бидиагонализацию Голубь-Кахана, которая приводит к автоматической регуляризации параметров. В [5] исследуется обратная задача оценки внешнего воздействия на системы в реальном времени. Предложенный подход к решению опирается на теорию групп Ли. Также задачи идентификации параметров анализировались, например, в работе [6], в которой предлагается решать подобные задачи с помощью рядов Фурье.

В данной работе предлагается новый оригинальный подход, который опирается на нестандартные вариационные методы. Рассматриваются детерминированные динамические системы, описываемые системой обыкновенных дифференциальных уравнений, нелинейных по фазовым координатам и линейных по параметрам, которые нужно идентифицировать. При этом предполагается, что известна информация о реализовавшемся движении системы, а именно, – дискретные неточные замеры наблюдаемой траектории, называемой базовой.

Идентификация проводится и уточняется в реальном времени по мере поступления новых замеров. Восстанавливаемые параметры могут быть нестационарными (ими могут быть неизвестные управления, порождающие наблюдаемую траекторию) и должны удовлетворять известным геометрическим ограничениям.

Необходимо заметить, что задача идентификации, вообще говоря, некорректна, так как одна и та же базовая траектория системы может реализоваться при разных допустимых наборах неизвестных параметров и управлений. Это может быть проиллюстрировано на простом примере следующей динамики:

$$\dot{x}(t) = k_1(t) + k_2(t), \qquad x \in R, \qquad k \in [-1,1] \times [-1,1], \qquad t \in [0,1].$$
$$x^*(t) \equiv 0, \qquad k(\cdot) \in \{\big(k_1(t), k_2(t)\big)^{\top} : k_1(t) + k_2(t) = 0\}.$$

В таком случае без дополнительных данных (помимо замеров траектории) невозможно в точности указать тот набор параметров или управлений, при котором возникла наблюдаемая базовая траектория. Чтобы регуляризировать эту задачу, вводится понятие нормального набора параметров (или управлений). А именно – такого допустимого набора параметров (или управлений), при котором реализуется базовая траектория и который имеет минимальный среднеквадратичный показатель (то есть норму в пространстве l^2 (или L^2)). Показано в работе [7], что при выполнении ряда достаточно общих предположений для любой базовой траектории, отвечающей набору параметров (или управлений), удовлетворяющих заданным ограничениям, существует единственный нормальный набор параметров (или управлений). Таким образом, задача реконструкции нормального набора параметров корректна (именно такая задача далее будет подразумеваться под задачей идентификации параметров).

Предлагаемый новый подход к решению задачи идентификации является развитием метода решения задач реконструкции управлений, предложенного Н.Н. Субботиной, Е.А. Крупенниковым и Т.Б. Токманцевым [7,8] и идейно близок к работам Ю.С. Осипова и А.В. Кряжимского [9] по решению обратных задач. Отметим, что последний подход имеет истоки в работах школы Н.Н. Красовского по оптимальному позиционному управлению [10].
Обоснование предлагаемого нового подхода опирается на результаты, полученные в работах [7,8]. Этот подход использует вспомогательные задачи вариационного исчисления на минимум интегрального регуляризированного по Тихонову [11] функционала невязки. Заметим, что традиционные подходы к решению обратных задач динамики, использующие вариационное исчисление, как правило используют выпуклые функционалы (см., например, [12]). В новом же подходе используются выпукло-вогнутые функционалы. Это нововведение обеспечивает то, что полученные в ходе решения динамические аппроксимации параметров порождают движения динамической системы, которые колеблются около получаемых замеров базовой траектории. При этом по мере уменьшения параметров аппроксимации (частоты и точности замеров, а также параметра регуляризации) амплитуда колебаний убывает, а частота колебаний возрастает. Такой характер поведения невязки хорошо поддается усреднению и регуляризирует результаты динамической аппроксимации, которые получаются и уточняются непосредственно по ходу развития наблюдаемого процесса (см. [8]).

Преимуществом нового подхода является также и то, что для решения задачи идентификации при этом не требуется подача специальных возмущений на наблюдаемую систему. Оценка и уточнение неизвестных параметров происходит в реальном времени в ходе стандартной или удобной эксплуатации динамической системы.

Предлагаемый численный алгоритм, решающий задачу идентификации параметров, является достаточно эффективным. Это обеспечивается тем, что задача идентификации сводится к интегрированию систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, для решения которых известно большое количество разнообразных стандартных численных методов.

Приведем точную формулировку задачи идентификации.

Рассматриваются динамические управляемые системы вида

$$\dot{x}(t) = G\big(t, x(t)\big)k(t) + f\big(t, x(t)\big), \quad t \in [0, T], \tag{1}$$
$$x(\cdot)\colon [0, T] \to R^n, \qquad k(\cdot)\colon [0, T] \to R^m,$$
$$G(\cdot)\colon [0, T] \times R^n \to R^{n\times m}, \qquad f(\cdot)\colon [0, T] \times R^n \to R^n,$$

где $k(\cdot)$ – вектор параметров (вход системы),
а $x(\cdot)$ – вектор фазовых координат (выход системы).

Допустимые динамические параметры – измеримые функции, удовлетворяющие геометрическим ограничениям

$$k(t) \in \boldsymbol{K} \ \text{ почти всюду на } [0, T], \tag{2}$$

где $\boldsymbol{K} \subset R^m$ – компактное выпуклое множество.

Предполагается, что с шагом h^δ поступают дискретные замеры базовой траектории $x^*(t)$, имеющие погрешность δ:

$$\big\{y_i^\delta, \quad i = 0, \dots, N\big\}, \quad ||y_i^\delta - x^*(t_i)|| \le \delta, \quad t_i = ih^\delta. \tag{3}$$

Вводятся следующие предположения о свойствах входных данных:

Предположение 1. Существуют такие параметры $d_0 > 0, \delta_0 > 0, h_0 > 0$ и такой компакт $\Psi \subset R^n$, что для всех $\delta \in (0, \delta_0], h^\delta \in (0, h_0]$

$$\bigcup_{i=\overline{0,N}} B_{d_0}\big[y_i^\delta\big] \subset \Psi,$$

где $B_r[x]$ – шар радиуса r с центром в x.

Предположение 2. В динамике (1) элементы матричной функции $G(\cdot)$ и вектор-функции $f(\cdot)$ липшицевы по совокупности переменных при $(t, x) \in D_0 = [0, T] \times \Psi$.

Предположение 3. Матрица $G(t, x)$ имеет ранг равный $\min\{m, n\}$ при $(t, x) \in D_0 = [0, T] \times \Psi$. Опираясь на работу [7], показано, что при выполнении введенных предположений существует единственный нормальный набор динамических параметров $k^*(\cdot)$.

Предположение 4. $k^*(\cdot)$ удовлетворяет ограничениям (2).

Задача идентификации: Для любого набора замеров, полученного при $\delta \in (0, \delta_0], h^\delta \in (0, h_0]$ найти такой набор динамических параметров $k^\delta(\cdot)\colon [0, T] \to R^m$, что

1. Значения $k^\delta(\cdot)$ ограничены существенно и равномерно по δ, h^δ.
2. При каждом наборе $k^\delta(\cdot)$ реализуется такая траектория $x^\delta(\cdot)$ системы (1) с краевыми условиями $x^\delta(0) = y_0^\delta$, что $x^\delta(\cdot)$ сходятся равномерно к $x^*(\cdot)$ при $\delta \to 0$.
3. Наборы динамических параметров $k^\delta(\cdot)$ сходятся слабо со звездой к нормальному $k^*(\cdot)$ при $\delta \to 0$.

Такой тип сходимости аппроксимаций обеспечивает возможность идентификации динамических параметров со скользящими режимами.

Алгоритм решения задачи идентификации: предлагается пошаговый алгоритм. На каждом i-ом шаге алгоритма строится решение на отрезке времени

$$[t_{i-1}, t_i] = \big[(i-1)h^\delta, i\,h^\delta\big], \ i = 1, \dots, N.$$

Построение решения на i-ом шаге начинается, как только поступает точка замеров y_i^δ. Сначала на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$ строится и тем самым продолжается функция $y^\delta(\cdot)\colon [0, t_i] \to R^n$ – непрерывная интерполяция дискретных замеров, осуществляемая с помощью кубических сплайнов первого порядка:

$$y^\delta(t_{i-1}) = y_{i-1}^\delta, \quad y^\delta(t_i) = y_i^\delta, \quad \dot{y}^\delta(t_{i-1}) = f(t_{i-1}, y_{i-1}^\delta), \quad \dot{y}^\delta(t_i) = f\big(t_i, y_i^\delta\big).$$

Эта функция используется во вспомогательной вариационной задаче на минимум функционала

$$I\big(x_i(\cdot), k_i(\cdot)\big) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} -\frac{||x_i(t) - y^\delta(t)||^2}{2} + \alpha^2 \frac{||k_i(t)||^2}{2}\, dt, \tag{4}$$

где α – малый регуляризирующий по Тихонову [11] параметр. Минимизация рассматривается на множестве непрерывно дифференцируемых функций $x_i(\cdot)\colon [t_{i-1}, t_i] \to R^n$, $k_i(\cdot)\colon [t_{i-1}, t_i] \to R^m$, удовлетворяющих уравнению динамики (1), с краевыми условиями

$$i = 1: \quad x_1(t_0) = y_0^\delta, \qquad \dot{x}_1(t_0) = \dot{y}^\delta(t_0),$$
$$i = 2, \dots, N: \quad x_i(t_{i-1}) = y_{i-1}^\delta, \qquad \dot{x}_i(t_{i-1}) = \dot{x}_{i-1}(t_{i-1}).$$

Необходимые условия оптимальности в этой вариационной вспомогательной задаче могут быть записаны в виде гамильтоновой системы обыкновенных дифференциальных уравнений [13]. Эта система линеаризуется путем «замораживания» коэффициентов в точках замеров, и после линеаризации имеет вид

$$\dot{x}_i(t) = -\alpha^{-2} G_i G_i^T s_i(t) + f_i,$$
$$\dot{s}_i(t) = x_i(t) - y^\delta(t),$$
$$t \in [t_{i-1}, t_i], \tag{5}$$
$$i = 1: \quad x_1(t_0) = y_0^\delta, \qquad \dot{s}_1(t_0) = 0,$$
$$i = 2, \dots, N: \quad x_i(t_{i-1}) = y_{i-1}^\delta, \qquad \dot{s}_i(t_{i-1}) = \dot{s}_{i-1}(t_{i-1}),$$
$$G_i = G\big(t_{i-1}, y_{i-1}^\delta\big), \qquad f_i = f\big(t_{i-1}, y_{i-1}^\delta\big),$$

где $s_i(\cdot)$ – вектор сопряженных переменных, соответствующий i-ому шагу.

Система (5) численно интегрируется (любым известным численным методом), и на основании полученного решения предлагается следующая динамическая аппроксимация решения задачи идентификации:

$$k_i^\delta(t) = -\alpha^{-2} G_i^T s_i(t), \qquad t \in [t_{i-1}, t_i]. \tag{6}$$

Формула (6) является одним из уравнений Эйлера во вспомогательной вариационной задаче.

Опираясь на результаты, опубликованные в [8], доказана следующая теорема:

Если для входных данных (1), (3) *выполняются предположения 1-4, то при выполнении условия согласования параметров аппроксимации*

$$h^\delta = h(\delta) \xrightarrow{\delta \to 0} 0, \qquad \frac{\delta}{h^\delta} \xrightarrow{\delta \to 0} 0,$$
$$\alpha = \alpha(\delta) \xrightarrow{\delta \to 0} 0, \qquad \frac{\alpha}{(h^\delta)^2} \xrightarrow{\delta \to 0} K_0 > 0$$

функции $k^\delta(\cdot)$ (6) *решают задачу идентификации.*

Заметим, что невязка полученных аппроксимаций траекторий возле замеров и поведение динамических аппроксимаций нормального набора динамических параметров имеют колебательный характер. Это обусловлено невыпуклой структурой функционала (4) (см. [8]) и использованием стационарных точек во вспомогательных вариационных экстремальных задачах. Если заменить функционал на выпуклый, то поведение невязки будет иметь экспоненциальный характер. Колебательный характер позволяет эффективно применять численные методы усреднения колебаний, что продемонстрировано на решении задачи идентификации для следующей механической системы.

Пример. Рассматривается модель динамического демпфера [14].

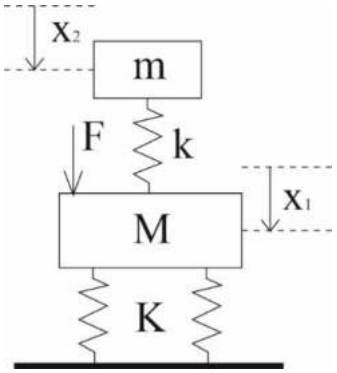


Рис. 1. Модель динамического демпфера

Динамика модели имеет вид

$$M\ddot{x}_1(t) = -K(t)x_1(t) - h(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k(t)\big(x(t) - y(t)\big) + F_0 \sin(\nu t),$$
$$m\ddot{x}_2(t) = h(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(t)\big(x(t) - y(t)\big),$$

$$t \in [0,5], \quad k \in [0,10], \quad K \in [0,10],$$
$$m = 20, \quad M = 50, \quad h = 0.1, \quad F_0 = 1, \quad \nu = 0.35, \quad x_1(0) = -0.5, \quad x_2(0) = -1.$$

Здесь x_1, x_2 – фазовые переменные, обозначающие отклонение пружин от нерастянутого положения соответственно для подвески главного тела (массой M) и для демпфера (массой m), h – коэффициент вязкого трения. На тело воздействует внешняя сила $F = F_0 \sin(\nu t)$. В роли неизвестных коэффициентов выступают параметры жесткости пружин подвески K и демпфера k. Считается, что они непостоянны (что позволяет описать, к примеру, износ пружины или её разрушение).

В качестве базовой траектории взято движение, реализующееся при параметрах

$$K(t) = 1 - (0.2t)^2, \quad k(t) = \begin{cases} 1.5, & t \in [0,2.5), \\ 0, & t \in [2.5,5]. \end{cases}$$

Отрицательное слагаемое в первом коэффициенте моделирует износ пружины, а разрыв во втором моделирует разрушение пружины. На траекторию, реализующуюся при выбранных коэффициентах, были наложены случайные возмущения ($\delta = 10^{-4}$) для симуляции входных данных (замеров траектории) в задаче идентификации. На основании полученных таким образом данных было построено решение этой задачи. Полученные аппроксимации динамических коэффициентов показаны на рис. 2,3.

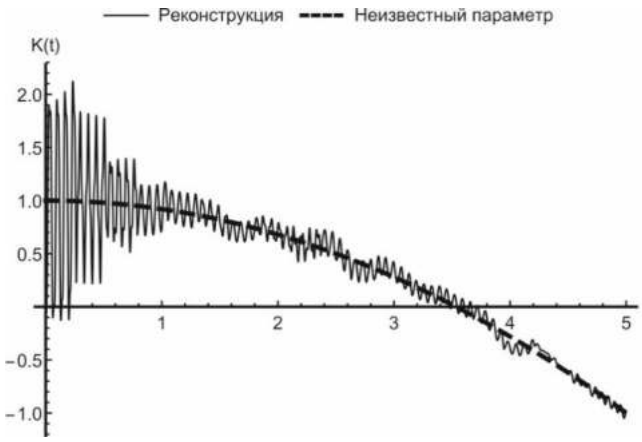


Рис. 2. Восстановленный параметр *K*.

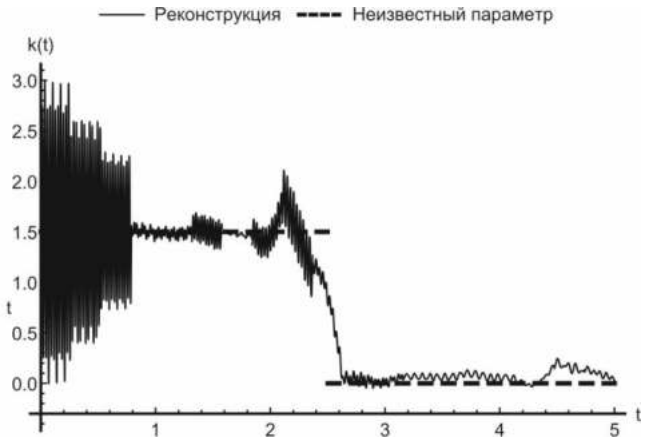


Рис. 3. Восстановленный параметр *k*.

Полученные аппроксимации были усреднены по следующему алгоритму: на каждом шаге $[t_{i-1}, t_i]$ функция $k_i^\delta(t)$ заменяется на усреднение.

$$\bar{k}_i^\delta = \frac{1}{h^\delta} \int_{t_{i-1}}^{t_i} k_i^\delta(t)\, dt.$$

Результаты усреднения представлены на рис. 4,5.

В заключение подведем итоги вышесказанному: предложен новый подход к решению задач идентификации параметров. Этот подход позволяет аппроксимировать (в слабом со звездой смысле) нестационарные неизвестные параметры (даже со скользящим режимом) путем построения динамических аппроксимаций. Подход не требует подачи на наблюдаемую систему специальных возмущений – идентификация производится в реальном времени по неточным замером наблюдаемого движения системы. Предложен численный алгоритм, основанный на новом подходе. С вычислительной точки зрения этот алгоритм сводит задачу идентификации к непрерывной интерполяции дискретных замеров и интегрированию систем линейных ОДУ стандартными методами, что обуславливает его высокую эффективность.

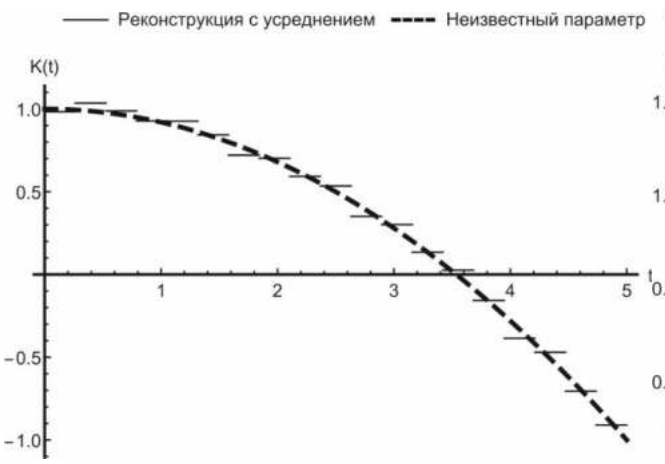


Рис. 4. Усредненный параметр *K*

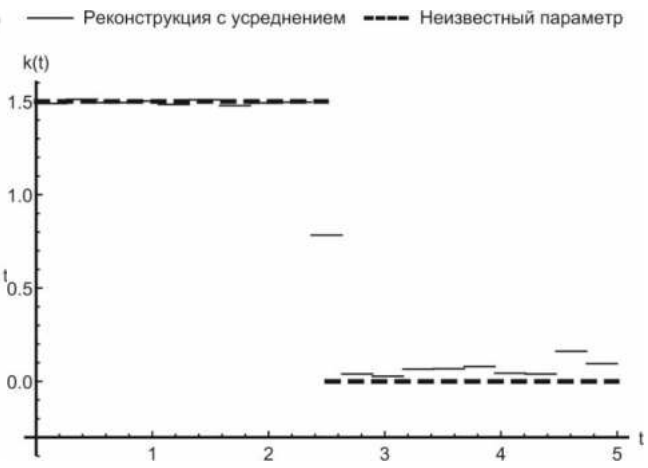


Рис. 5. Усредненный параметр *k*.

В будущем планируется развить новый подход на случай распределенных систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-01-00362).

Библиографический список

1. **Ngoc, D.V.** Dynamic model identification for industrial robots / D.V. Ngoc, H. Marcelo, Jr. Ang // Acta Polytechnica Hungarica. – 2009, – vol. 6, – № 5, – P. 51-68.

2. **Sturz, Y.R.** Parameter identification of the KUKA LBR iiwa robot including constraints on physical feasibility / Y.R. Sturz, L.M. Affolter, R.S. Smith // IFAC Papers OnLine. – 2017, – vol. 50, – № 1, – P. 6863-6868.

3. Dynamic force identification problem based on a novel improved Tikhonov regularization / C. Ren [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. – 2019, – vol. 2019, – № 6095184.

4. Efficient generalized Golub–Kahan based methods for dynamic inverse problems / J. Chung [et al.] // Inverse Problems. – 2018, – vol. 34, – № 024005.

5. A high-order Lie groups scheme for solving the recovery of external force in nonlinear system / Y.C. Liu [et al.] // Inverse Problems in Science and Engineering. – 2018, – vol. 26, – № 12, – P. 1749-1783.

6. **D'Autilia, M.C.** Parameter identification in ODE models with oscillatory dynamics: a Fourier regularization approach. / M.C. D'Autilia, I. Sgura, B. Bozzini // Inverse Problems. – 2017, – vol. 33, – № 12. 124009.

7. **Subbotina, N.N.** Hamiltonian systems for dynamic control reconstruction problems / N.N. Subbotina, E.A. Krupennikov // Minimax Theory Appl. – 2020, – vol. 5, – № 2, – P. 439-454.

8. **Субботина, Н.Н.** Слабые со звездой аппроксимации решения задачи динамической реконструкции / Н.Н. Субботина, Е.А. Крупенников // Тр. Института математики и механики УрО РАН. – 2021, – Т. 27, – № 2, – С. 208-220.

9. **Кряжимский, А.В.** О моделировании управления в динамической системе / А.В. Кряжимский, Ю.С. Осипов // Изв. АН СССР. Сер. техн. кибернетика. – 1983, – № 2, – С. 51-60.

10. **Красовский, Н.Н.** Позиционные дифференциальные игры / Н.Н. Красовский, А.И. Субботин // Москва. Наука. – 1974, – 456 с.

11. **Тихонов, А.Н.** Об устойчивости обратных задач / А.Н. Тихонов // Докл. АН СССР. – 1943, – Т. 39, – № 5, – С. 195-198.

12. Efficient algorithms for the regularization of dynamic inverse problems: I. Theory / U. Schmitt [et al.] // Inverse Problems. – 2002, – vol. 18, – № 3, – P. 659-676.

13. **Иоффе, А.Д.** Теория экстремальных задач / А.Д. Иоффе, В.М. Тихомиров // Москва. Наука. – 1974, – 480 с.

14. Математические модели в естествознании и технике / А.В. Островский [и др.] // Издательство Нижегородского госуниверситета. – 2007, – 123 с.

УДК 621.8 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_152

В.М. Фаталиев, д-р филос. по технике, **Э.А. Мамедов,** д-р техн. наук (Азербайджанский Технический Университет)

ПАКЕТНЫЙ РЕДУКТОР НА БАЗЕ ДВУХ НЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОСЕЙ

Аннотация. *Статья посвящена расчету и обоснованию пакетного редуктора с неподвижными осями. Показаны кинематическая схема однопоточного трехступенчатого зубчатого колесного передачи с двумя не вращающимися осями, изменение напряжения на не вращающихся осей и даны формулы для расчета параметров конструктивных элементов.*

The article is devoted to the calculation and justification of the packet reducer with fixed shafts. The kinematic scheme of a single-threaded three-step gear transmission with two non-rotating axes, the change of tension of non-rotating axes and the formulas for calculating the parameters of structural elements are shown.

Ключевые слова: пакетный редуктор, не вращающиеся оси, внешние и внутренние нагрузки, осевая и радиальные нагрузки, ступица.
Keywords: batch gearbox, non-rotating axles, external and internal loads, axial and radial loads, hub.

Это устройство, базирующееся на подшипниках качения или радиально игольчатых роликовых подшипниках у основания двух неподвижных осей, передающее крутящий момент через зубчатые колеса, расположенные на осях, и не создающее динамических колебаний на них, обеспечивает систему зубчатых передач.

Новый агрегат представляет собой редуктор на основе не вращающихся осей, применяемых в машиностроении, сельском хозяйстве, военной промышленности, авиации, вертолетостроении, судоремонте и приборостроении может быть применена ко всем цилиндрическим плоским и косым зубчатым колесам, включая цепные, зубчатые редукторы [1, 4].

По качественным характеристикам на базе двух не вращающихся осей может быть создано 2.3.4.5.6.7 и более многоступенчатый пакетный редуктор и согласно ГОСТ 20758-75, ГОСТ 21351-75 и ГОСТ 21426-75 можно получить любое соответствующее передаточное число.

Пакетные редукторы могут быть 1 и 2 потоковыми. Эти редукторы представляют собой редуктором с пакетом неподвижных осей. Оси, в отличие от валов, не передают крутящего момента, не подвергаются кручению, принимают только продольные и радиальные нагрузки на ось. Показателем точной работы трансмиссии является среднее числовое значение циклических ошибок за один период (рис.1)

$$\Delta F = \frac{a_1 + a_2 + \ldots + a_n}{n} \tag{1}$$

Это относится к толщине зуба, правильности шага и эвольвента. Прикосновение (контакт) между зубами связано с процентом пятен, образующихся в процессе. По длине зуба

a/b·100%, по высоте зуба b/h·100% и нагрузки на рабочие машины могут быть выражены в очень широких интервалах.

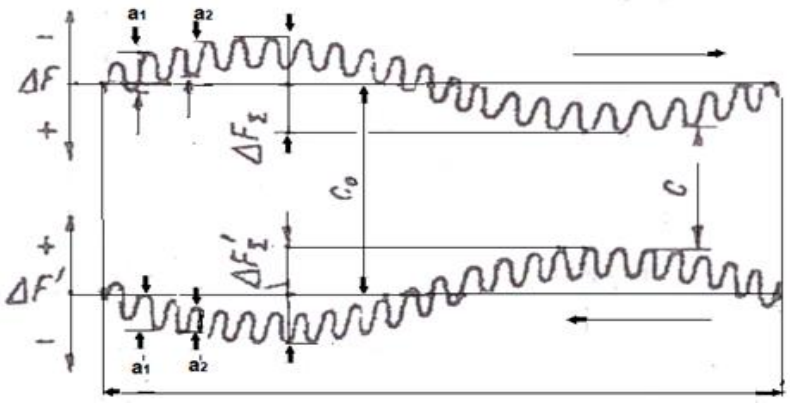


Рис.1. Среднее числовое значение циклических ошибок за один период зубчатых передач

На валах традиционных редукторов изменяются крутящие моменты, (рис. 2) то есть параметры меняются и на двигателях. В зубчатых колесах от зацепления возникают внутренние и внешние динамические нагрузки, которые в расчетах учитывается введением специального коэффициента согласно ГОСТ 21354-87.

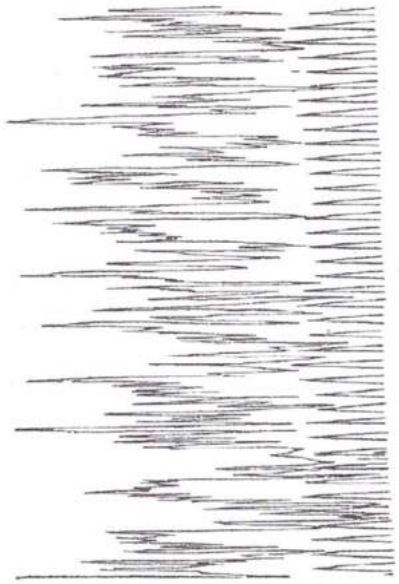


Рис.2. Внутренние и внешние динамические нагрузки на валах традиционных редукторов

При вращении валов в редукторах возникают колебания изгиба и кручения. В пакетном редукторе на основе не вращающихся осей, возникает только деформация изгиба.

Изгиб валов, горизонтальные смещения, зависящие от деформации корпуса и подшипниках, т.е. поправоки на вертикальные смещения $У_1$ и $У_2$ в зависимости от X_1 и X_2 определяются следующим образом (рис. 3):

$$Y_1 = X_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad (2)$$

$$Y2 = X2 \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad (3)$$

где α-угол сцепления [2].

Отличительная черта осей в том, что одна сторона оси без подшипника базируется к корпусу специальной посадкой Н7/к6. Деформационные смешения в пакетных редукторах уменьшаются в два раза, что является одним из отличительных признаков от существующих редукторов, в валах которых возникают крутящий момент и динамические нагрузки [6].

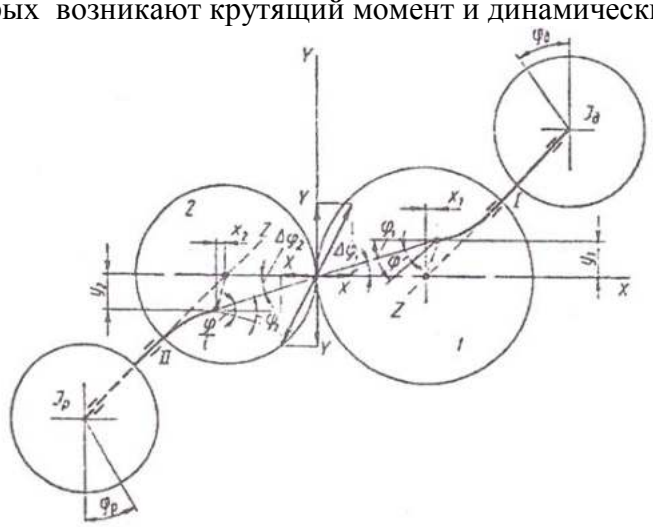


Рис.3. Изгиб валов, горизонтальные смещения, зависящие от деформации корпуса и подшипников

Количество валов уменьшается не менее чем в 2 раза и более. По мере увеличения числа ступеней в соответствии с передаточным числом предлагаемом пакетном редукторе коэффициент полезного действия повышается, потому что оси неподвижны и в отличие от существующих редукторов крутящий момент не создается. Зубчатые колеса в 2 раза меньше подвержены деформациям, чем обычные редукторы, так как не имеют крутящего момента и нагрузки на оси распределяются равномерно. Уменьшение количества описываемых конструктивных элементов приводит к повышению уровня надежности редуктора [2,5] (рис.4). На рисунке 5 показана кинематическая схема однопоточного трехступенчатого зубчатого колесного передачи с двумя не вращающимися осями.

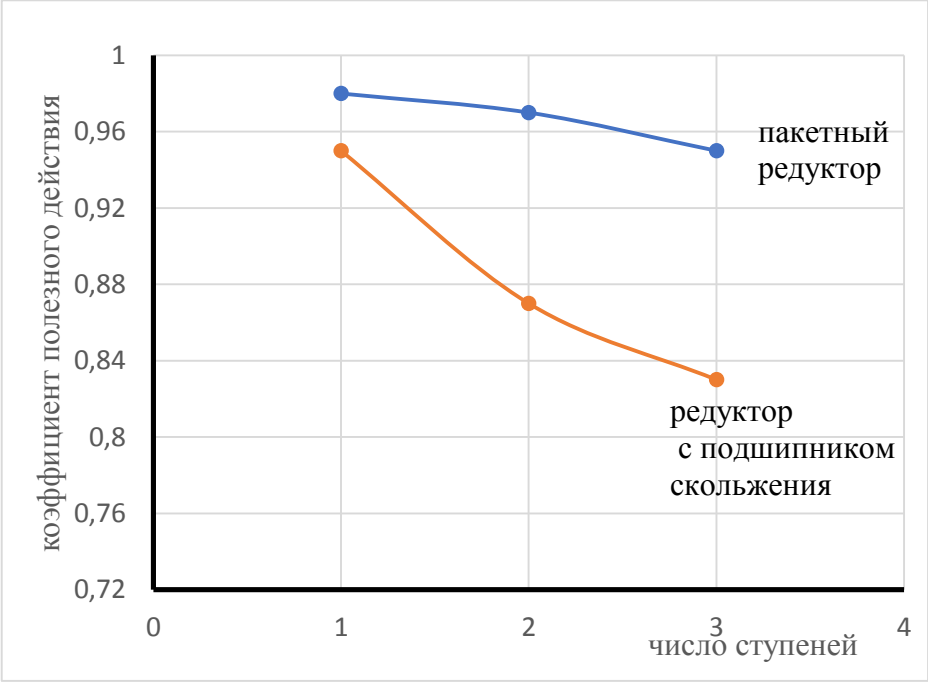


Рис.4. График фактического изменения коэффициента полезного действия в зависимости от числа ступеней

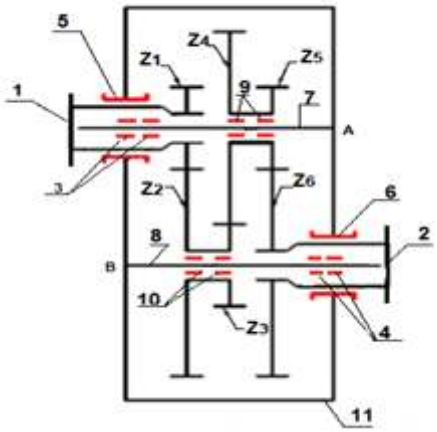


Рис.5. Кинематическая схема передачи

На входе и выходе редуктора (1, 2), установлены вращающееся ступицы. Как видно из схемы, входные и выходные подшипники конструктивно оформляются через две подшипники качения или две радиально-игольчатые роликовые подшипники (3, 4) в соответствии с неподвижными осями А и В. Также ступицы базируются в корпус соответствующими подшипниками (5, 6).

А - входной ступица, расположенный на неподвижной оси, подвешивается через ремень движения, цепь или муфт передачи. Колесо Z_1-шестерни, размещенное на ступице, может быть конструктивно спроектировано вместе с ступицей. Его движение передается на зубчатое колесо Z_2 с парной ступенью. Парное ступенчатое зубчатое колесо-Z_3 передает движение парному ступенчатому колесу-Z_4, расположенному на неподвижной оси А. Парная зубчатая передача-зубчатая передача Z_5 передает движение зубчатому колесу Z_6, расположенному на выходном ступице. Выходной ступица передает движение на другую приводу.

$$İ_1=\frac{Z_2}{Z_1}\ ;\quad İ_2=\frac{Z_4}{Z_3};\quad İ_3=\frac{Z_6}{Z_5}\ ;\quad İ_n=\frac{Z_n}{Z_{n-1}};\tag{4}$$

$$I_{об.}=I_1\cdot I_2\cdot I_3\cdot I_n,\tag{5}$$

- соединения других концов осей А и В с корпусом (11) должно соответствовать Н7/к6;
- к редуктору применимо подшипники качения или радиально игольчатые роликовые подшипники (3,4,5,6,9,10);
- Оси А и В (7,8) неподвижны, не передают крутящего момента, динамические колебания не возникают;
- не требуется полная смазка, необходимая для подшипников скольжения;
- К.п.д. превосходит трансмиссию на основе подшипников скольжения, работающим в условиях полусухой смазки;
-Z_2, Z_3 и Z_4,Z_5-парные ступенчатые шестерни;
-Зубчатое колесо Z_1 изготовлено вместе с входным ступицам редуктора, а зубчатое колесо Z_6- зубчатое колесо базируется с помощью шпонки на ступице;

Прежде чем перейти к объяснению кинематического описания редуктора на базе трехступенчатых неподвижных осей потока, следует отметить, что для неподвижных осей $[\sigma_{из}]$ принимается в 1,75 раза больше расчетного значения [1]. Наибольшее напряжение в поперечном сечении

$$\sigma_x=\frac{M_x}{0.1d_x^3}=[\sigma_{из}]\ ;\tag{6}$$

Здесь d_x является наибольший расчетный диаметр оси

$$d_x=\sqrt[3]{\frac{M}{0.1[\sigma_{из}]}}\ ;\tag{7}$$

Из формулы (7) видно, что увеличение [$\sigma_{из}$] в 1,75 раза приводит к уменьшению расчетного диаметра d оси, что выгодно в экономическом смысле.

Изменение напряжения не вращающихся осей происходит по так называемому ритмичному циклу (рис. 6) [5].

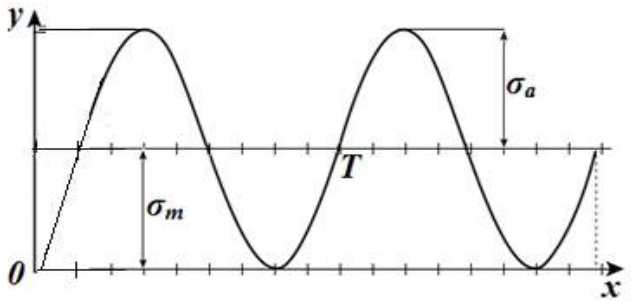


Рис. 6. Изменение напряжения не вращающихся осей

Амплитуда напряжения и ее среднее значение σ_m рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{из}}{2} \quad (8);$$

$$S = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma \cdot \sigma_a}{K_d \cdot K_v} + \Psi_m \sigma_m} = \frac{2\sigma_{-1}}{\left(\frac{K_\sigma}{K_v K_d + \phi_m}\right)\sigma_{из}} \geq |S| \; ; \quad (9)$$

здесь Ψ_m-коэффициент асимметрии цикла напряжения,

$\sigma_{m,}\sigma_a$ – среднее значение амплитуды напряжения,

K_v- коэффициент, учитывающий чистоты поверхности,

$|S|$- допустимый коэффициент запаса,

K_σ- коэффициент концентрации напряжения,

K_d - коэффициент, учитывающий геометрического размера.

Для нормальной работы трансмиссии оси должны быть достаточно жесткими. В противном случае происходит концентрация напряжения на передаче зубчатых колес, сила, падающая на колодки, распределяется по их длине неравномерно.Жесткость осей определяется их максимальным углом поворота. Для регулирование жесткости $У_{max}$ и Θ_{max} должны быть меньше, чем соответствующая допустимое значение, т.е.

$$У_{max} \leq [У],$$
$$\Theta_{max} \leq [\Theta].$$

После принятия геометрических размеров осей значения $У_{max}$ и Θ_{max} рассчитываются известными способами.

Библиографический список

1. **Kərimov, Z.H.** Maşın hissələri və yükqaldırıcı-nəqledici maşınlar. / Z.H. Kərimov // Bakı,“Maarif”, 2002. Səh., 376.

2. **Fətəliyev, V.M.** Dişli çarx ötürmələri, onların dinamikası və sınaq stendləri. Ali texniki məktəblər üçün dərs vəsaiti. / V.M.Fətəliyev// Bakı, “Maarif”, 2004. Səh., 45.

3.**Решетов, Д.Н.** Детали машин / Д.Н. Решетов //М. «Машиностроение» 1975. 656 с.

4.**Свирщевский,Ю.И.**Расчет и конструирование коробок скоростей и подач. / Ю.И. Свирщевский, Н.Н. Макейчик // Издательство «Вышэйшая школа», Минск, 1976. 584с.

5. **Kərimov, Z.** Maşın hissələrinin uzunömürlüyü. Ali texniki məktəblər üçün dərs vəsaiti / Z.Kərimov // Bakı, “ELM”, 2009. Səh., 113.

6.**Евразийский патент № 017053** B1, F16H 1/20 ЕАПО, Москва, 2012, Бюллетень № 9, 4 с. Абдуллаев А.И., Наджафов А.М. Аналитическая кинематика зубчатых передач.

УДК 621.33.025 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_157

В.Н. Черных, А.В. Бойко (Ростовский государственный университет путей сообщения)

АНАЛИЗ АДГЕЗИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. *В статье приводится анализ механического принципа адгезии воды на устройства контактной сети переменного тока при помощи климатической камеры.*

The article analyzes the mechanical principle of water adhesion on AC contact network devices using a climatic chamber.

Ключевые слова: адгезия, контактная сеть, профилактический подогрев, гололёд, климатическая камера.
Keywords: adhesion, contact network, preventive heating, ice, climatic chamber.

Контактная сеть (КС) как и воздушные линии (ВЛ) ЛЭП подвержены большому количеству атмосферных воздействий, которые оказывают негативное влияние на надежность и работоспособность линии, ввиду своего расположения на открытых местностях. Также следует отметить, что данные системы электроснабжения не имеют резерва, а потому обеспечение их защиты и поддержания работоспособности является важной задачей [1].

Гололёдные образования на устройствах контактной подвески образуются при определённом сочетании температуры окружающей среды, влажности и ветра. Это и является ярким примером механического принципа адгезии воды на поверхность устройств контактной сети. Адгезией (рис. 1), в общем смысле, называется соединение между собой двух и более материалов, которые отличаются друг от друга по своему составу и внутренней структуре.

Выделяют три основных принципа адгезионного соединения:

1) механический;
2) химический;
3) физический.

Механический – сцепление возникает благодаря «прилипанию» наносимого материала к основанию. Он основан на способности проникновения вещества в поры или шероховатости поверхности верхнего слоя. В качестве примера можно привести окраску поверхности бетона или металла.

Химический – связь между материалами в том числе различной плотности происходит на атомном уровне. Для образования такой связи необходимо присутствие катализатора примером такой адгезии можно назвать пайку или сварку.

Физический – на сопрягаемых поверхностях происходит процесс возникновения статического заряда, может образоваться в результате возникновения статического заряда или под действием постоянного магнитного или электромагнитного поля.

Но в отличие от строительства, где адгезию пытаются искусственно повысить, задача железных дорог состоит в том, чтобы минимизировать это свойство в целях сохранения надежности и работоспособности всей системы [2].

Применение плавки гололёда или включение профилактического подогрева проводов контактной подвески позволяют значительно снизить вероятность наступления аварий.

Профилактический подогрев проводов КС необходимо применять до момента образования гололёда. Определение такого момента точного включения и является основной задачей на сегодня. Исполнение поставленной цели позволит в значительной степени повысить надёжность, работоспособность и защиту устройств контактной сети от перегрузок, вызванных образованием на них гололёдных отложений [3]. Помимо вышеописанных преимуществ, следует помнить и о положительном экономическом эффекте.

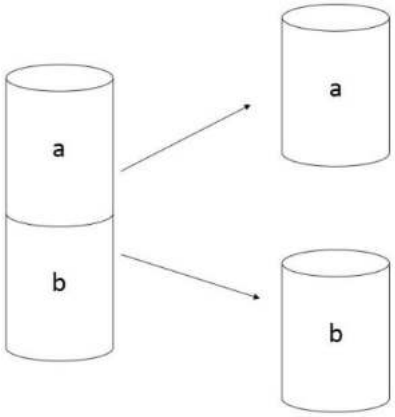


Рис. 1. Схематическое изображение эффекта адгезии

Необходимость профилактического подогрева проводов КС и решение о его применении должны приниматься, основываясь на данных, которые регистрируются, преобразуются и обрабатываются в режиме реального времени с датчиков контроля установленных непосредственно на КС с использованием комплекса ЭВМ.

Для установления факторов, влияющих на образование гололёда, был проведен ряд экспериментов [4]. Для этого были взяты контактные провода и несущие тросы наиболее распространённых контактных подвесок, а именно МФ-100 и ПБСМ-95 (рис. 2-3).

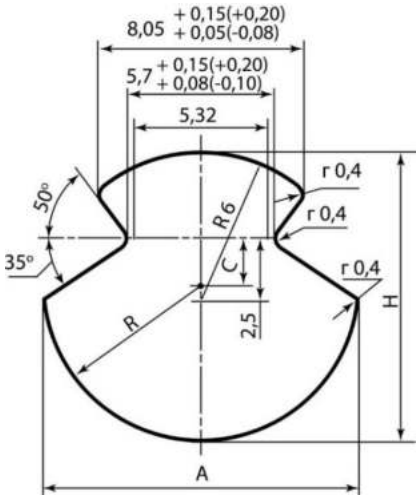


Рис. 2. Сечение контактного медного фасонного провода МФ-100

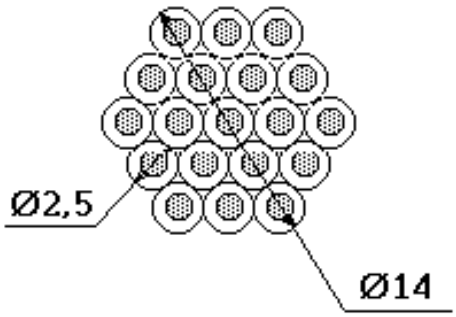


Рис. 3. Сечение несущего биметаллического сталемедного троса ПБСМ-95

Они помещались в специальную климатическую камеру (рис. 4-5), которая позволяет воспроизвести в лабораторных условиях близкие к реальным параметры окружающей среды, при которых образуется лед.

Рис. 4. Климатическая камера HD KWGDS62IF фирмы Hyde Science and Technology Limited. Научно-исследовательский и испытательный центр «Криотрансэнерго» (НИИЦ КТЭ ФГБОУ ВО РГУПС)

Рис. 5. Контактный провод марки МФ 100 внутри камеры, перед началом эксперимента

В ходе эксперимента исследуемый объект перед каждым испытанием взвешивался, после чего помешался в климатическую камеру, выбирались параметры температуры и влажности, и исследуемый образец находился в таких условиях определенный период времени.

По окончании времени испытания, исследуемый объект изымался из камеры регистрировалась его наружная температура при помощи термометра, а также вес.

Следует также отметить, что для чистоты эксперимента и повышения статистического сбора и анализа данных, исследуемые объекты находятся в разном техническом состоянии. То есть были взяты новые провода, и со следами эксплуатации в различном диапазоне от средне изношенных до предельно допустимых значений.

Суть эксперимента в том, чтобы понять и экспериментальным путём установить те параметры окружающей среды, при которых только начинает появляться гололёд, что позволит в дальнейшем использовать профилактические подогрев устройств контактной сети

именно в такие моменты. Это значительно снизит экономические затраты и повысит надёжность и работоспособность системы.

Для того, чтобы процесс выбора момента включения профилактического подогрева контактной сети происходил в нужный момент, а также для своевременной диагностики и выявления предаварийных ситуаций, связанных с метеорологическими воздействиями на контактную подвеску, необходима разработка и внедрение системы раннего обнаружения гололёда.

Эта система должна отвечать следующим требованиям:

- регистрация условий окружающей среды (температура, скорость и направление ветра и т.д.);
- установление длины участка КС, покрытого гололёдом;
- измерение температуры провода;

Очевидно, что для реализации вышеперечисленных требований к системному подходу борьбы с гололёдообразованием на устройствах КС необходим комплекс устройств, которые будут в совокупности контролировать и сигнализировать оператору (дежурный) о возможном начале процесса образования гололёда.

Библиографический список

1. Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения / В.А. Осипов [и др.] // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: ivdon.ru/ magazine/ archive/n1y2013/1539.

2. **Трубицин, М.А.** Проблема гололёда на проводах воздушных линий системы электроснабжения железнодорожного транспорта / М.А. Трубицин, О.Г. Лукашевич // Инженерный вестник Дона, 2017, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4582.

3. **Безуглый, А.В.** Выбор оптимальных физических параметров режима плавки гололеда на контактной сети постоянного тока / А.В. Безуглый, Н.А. Попова // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5382

4. **Семёнов, Ю.Г.** Основы контроля дуговых нарушений токосъёма в электротяговых сетях: Монография. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 139 с.

УДК 621. 896 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_160

В.В. Шаповалов, д-р техн. наук, **М.А. Буракова,** канд. техн. наук, **П.В. Харламов,** канд. техн. наук, **Т.Л. Саямова, Р.А. Корниенко, В.Б. Мищиненко** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНО-РОТАПРИНТНОЙ ЛУБРИКАЦИИ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО-РЕЛЬС»

Аннотация. *Актуальность вопросов снижения интенсивности изнашивания рабочих поверхностей бандажей колес локомотивов и рельсов связано с высоким уровнем финансовых затрат железнодорожной отрасли, направляемых на устранение негативных последствий данного явления. Фрикционная система колесо-рельс определяет основные технико-экономические и экологические показатели железнодорожной отрасли, влияющие на её конкурентоспособность. Надежность и стабильность данной системы связана с нелинейными процессами, протекающими в контакте колесо рельс. Величина прицепной нагрузки, величина тормозного пути, уровень шумового воздействия на окружающую среду определяются параметрами данной системы.*

The relevance of the issues of reducing the intensity of wear of the working surfaces of the wheel bands of locomotives and rails is associated with a high level of financial costs of the railway industry aimed at eliminating the negative consequences of this phenomenon. The wheel-rail friction system determines the main technical, economic and environmental indicators of the railway industry that affect its competitiveness. The reliability and stability of this system is associated with nonlinear processes occurring in wheel-rail contact. The size of the trailer load, the size of the braking distance, the level of noise impact on the environment are determined by the parameters of this system.

Ключевые слова: железнодорожный путь, кривые участки пути, боковой износ, гребнерельсосмазывание, контактно-ротапринтная технология, термометаллоплакирование, модификатор трения, коэффициент трения, силы крипа, поверхности трения, адгезионная составляющая, деформационная составляющая, лубрикация, рабочая поверхность.
Keywords: railway track, curved sections of track, lateral wear, grebnerel lubrication, contact-rotaprint technology, thermometalloplakirovanie, friction modifier, coefficient of friction, creep forces, friction surfaces, adhesive component, deformation component, lubrication, working surface.

Динамически нагруженная фрикционная подсистема колесо – рельс определяет основные технико-экономические и экологические характеристики тягового подвижного состава, а соответственно и всей системы «путь – подвижной состав». Актуальным является определение таких показателей как величина прицепной нагрузки, длина тормозного пути, значительные финансовые затраты, связанные с эксплуатацией подсистемы «колесо-рельс», в частности ресурс колесных пар и рельсов, экологические показатели системы «путь – подвижной состав» и др. С целью улучшения вышеназванных характеристик учеными ФГБОУ ВО РГУПС (RSTU) совместно со специалистами ОАО «РЖД» была создана инновационная энергосберегающая технология термометаллоплакирования (ТМП) стальных рабочих поверхностей динамически нагруженных открытых узлов трения, в частности фрикционной подсистемы «колесо-рельс».

Основой создания технологии, технологического оборудования и расходного материала метода ТМП рабочих поверхностей открытых узлов трения, (патент на изобретение № 2674899) является теория реализации анизотропии фрикционных связей [1]. В свою очередь, данная теория базируется на исследованиях в области физики взаимодействия твердых тел, в частности динамики формирования фактической площади контакта (ФПК) при трении покоя, качения, скольжения и качения с проскальзыванием. При этом учитывается тот факт, что тангенциальная составляющая фрикционного силового взаимодействия определяется величинами адгезионной и деформационной составляющих. Как известно, формирование деформационной составляющей обязательно сопровождается изменением динамической адгезионной составляющей.

Параметрами, наиболее коррелируемыми с силой адгезионного взаимодействия, являются время неподвижного контакта, время релаксации, скорость относительного скольжения и контактная нагрузка. Задача оптимизации параметров фрикционной связи «колесо – рельс» комплексная и включает следующие проблемы: повышение тягового усилия, снижение потерь тяговой мощности, увеличение ресурса колесных пар и рельсов, т.е. снижение интенсивности износа рабочих поверхностей колес локомотива и боковой поверхности головки рельса, устранение негативных последствий применения кварцевого песка в качестве модификатора (активатора) трения, повышение экологических показателей системы «путь – подвижной состав», такие как снижение уровня шума, связанного с фрикционным взаимодействием колеса с рельсом [2-4].

С целью решения вопроса повышения тягового усилия локомотива и снижения потерь тяговой энергии, а также снижению уровня шумового воздействия на окружающую среду была разработана комплексная технология термометаллоплакирования, включающая в себя

оптимизированный состав расходного материала (брикеты- стержни с термопластом адгезивом в оболочке из мягкого теплопроводящего металла, например, алюминия или его сплавов, а также соответствующее технологическое оборудование).

На основании квантово-химического анализа и теоретического определения максимальных значений сил адгезионного взаимодействия со стальной поверхностью, поверхности круга катания колеса локомотива, в качестве материала для формирования поверхности с заданными анизотропными характеристиками были выбраны алюминиевые сплавы с оптимизированным составом входящих в него компонентов – *Al* (*C*).

Экспериментальная проверка данных квантово-химического анализа параметров адгезионных связей величин и скоростей их формирования выполнялась на установке реверсивного трения. Как показали экспериментальные исследования значения адгезионной составляющей *Fe – Al*, при уровне трибоэнергетического процесса взаимодействия брикета модификатора и стальной поверхности бандажа колеса в режиме трения качения с проскальзыванием при скорости скольжения не более 3% соответствующих режиму предварительного смещения контактирующих микро- и макрошероховатостей, а значения коэффициента трения $f_{тр}$ соответствует трению покоя $f_{тр}$.

Способ термоплакирования поверхности гребня колеса локомотива, реализуемый системой прижатия твёрдого смазочного стержня к поверхности гребня колеса, отличается тем, что с целью повышения эффективности системы «колесо – рельс» локомотива осуществляется термоплакирование поверхности гребня колеса металлами с низкой твердостью, например, из алюминия или из его сплавов. Теоретической базой предлагаемой технологии является «Способ повышения эффективности фрикционных систем» [1], а экспериментальной базой – уникальный катковый стенд, позволяющий моделировать взаимодействие подвижного состава и рельс.

Комплексные исследования термоплакирования рабочих поверхностей колес подвижного состава мягкими металлами, показали максимальный эффект повышения силы тяги локомотива, что позволяет значительно экономить энергоносители и энергоресурсы, при увеличении ресурса работы колесных пар. В случае нанесения на тяговую поверхность круга катания колеса локомотива тонкого слоя алюминия обеспечивается увеличение сил продольного крипа на 20…30%. Такое увеличение тягового усилия связано с высокой скоростью формирования адгезионной составляющей алюминия (в частности разработанных рецептур алюминиевых сплавов), а также низким уровнем предельных значений тангенциальной τ и нормальной σ составляющих напряжений.

В режиме реализации сил поперечного крипа, при вписывании в криволинейные участки пути и движение по синусоиде при наличии на поверхности круга катания колеса *Al* коэффициент трения (сцепления) падает до уровня 0,18…0,20. Данное снижение объясняется увеличением тепловыделения пропорционально увеличению примерно в *n* раз скорости скольжения, т.е.

$$n = \frac{v_{\text{поп}}}{v_{\text{прод}}} = \frac{100\ \%;}{2{,}5\ \%} \approx 40,$$

а соответственно и температура вспышки на вершинах, контактирующих микро-макронеровностей колеса и рельса.

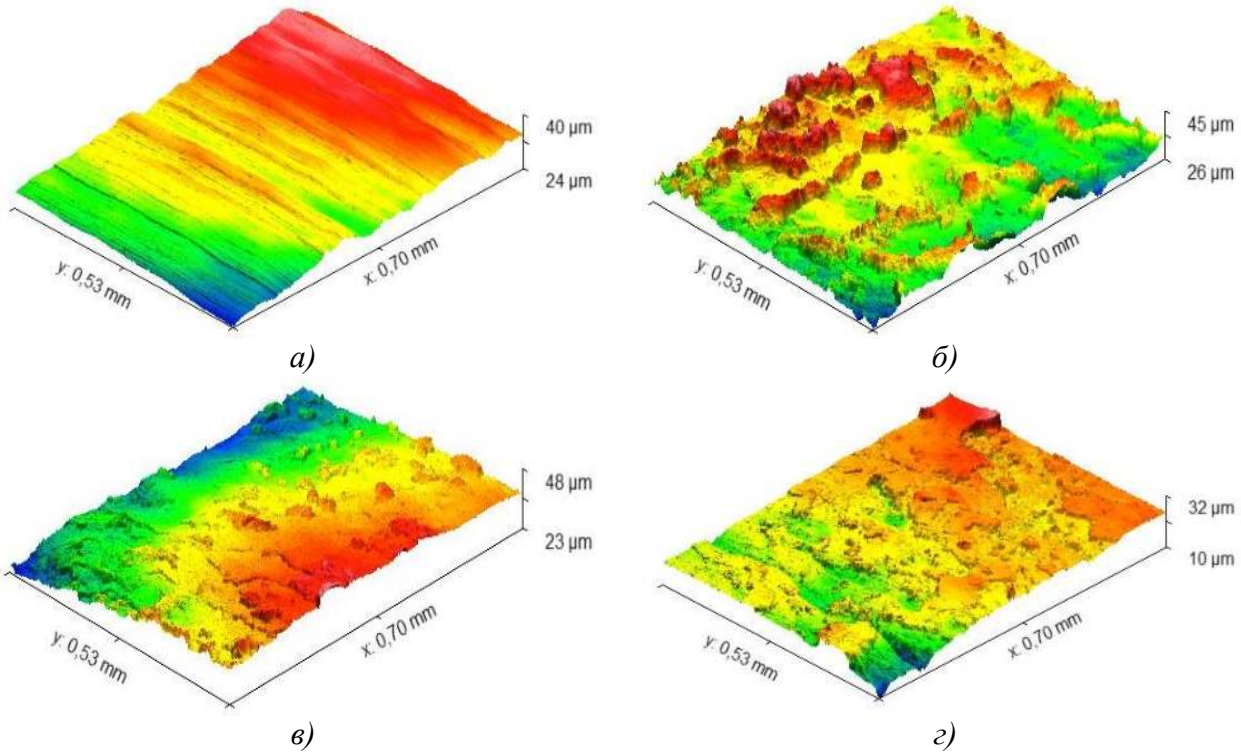
Одним из важнейших элементов технологии ГРС-РАПС, определяющих её эффективность, является привод подачи (прижатия) термометаллоплакирующих брикетов к рабочим поверхностям бандажа колеса. Как известно, процесс плакирования (фрикционного натирания) основан на активизации адгезионных связей до уровня:

$$F_{ад} > F_{ког} \tag{1}$$

где $F_{ад}$ и $F_{ког}$ – силы адгезионного и когезионного взаимодействия во фрикционном контакте.

Одним из ведущих факторов реализации процесса образования «пленки-покрытия» с заданными функциональными свойствами является уровень температур вспышки во фрикционном контакте [5,6].

Процесс термометаллоплакирования поверхности круга катания имеет два этапа. На первом этапе торцом брикета ТМП осуществляется очистка рабочей поверхности круга катания бандажа колеса от окислов и загрязнителей до уровня ювенильной поверхности, происходит тонкое микрошлифование и залечивание усталостных микротрещин в самом начале их формирования, результатом окончания первого этапа является увеличение адгезионного взаимодействия плакируемой поверхности с материалом брикета ТМП. На втором этапе происходит нанесение на уже подготовленную при первом этапе плакируемую поверхность тонкого слоя материала брикета ТМП, толщиной около 0,2 – 4 мкм. Процесс термометаллоплакирования поверхности гребня колеса состоит так же из двух этапов. Первый этап аналогичен процессу плакирования тяговой поверхности бандажа, а в результате второго этапа, на подслой, сформированный на поверхности гребня наносится определенный слой материла, толщина которого зависит от требуемого режима лубрикации, так для режима гребнесмазывания толщина слоя составляет 6 – 20 мкм, а для режима гребнерельсосмазывания 40 –100 мкм. На рисунке 1 представлены поверхности образцов пар трения при взаимодействии с различными модификаторами ТМП [7,8].



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 1. Поверхности образцов пар трения при взаимодействии с различными модификаторами ТМП

а) Поверхности образца до нанесения материала модификатора ТМП;
б) Поверхности образца после нанесения материала модификатора ТМП-1;
в) Поверхности образца после нанесения материала модификатора ТМП-2;
г) Поверхности образца после нанесения масляного загрязнителя и материала модификатора ТМП-2;

С целью повышения эффективности технологии ГРС-РАПС были проведены работы по оптимизации параметров консервативного привода ГРС. В частности, был разработан консервативный привод в виде витой цилиндрической пружины из стальной ленты переменной жесткости. [4]. Данное технологическое оборудование гребнерельсосмазывания

(ГРС) и применение смазочных стержней семейства РАПС ТМП-А, согласно патенту РФ №2740465, позволили на порядок увеличить ресурс разовой заправки бункера лубрикатора и довести его до 700 км в режиме гребнерельсосмазывания и до 6-8 тыс.км в режиме гребнесмазывания [5-8]. Таким образом, применение ТМП поверхности круга катания колеса позволяет повысить на 20…30 % тяговое усилие локомотива, снизить в 5…7 раз интенсивность износа (проката) колеса. Кроме этого обеспечивается снижение сил сопротивления движению, сокращается примерно в 6 раз уровень потерь тяговой энергии при наличии сил поперечного крипа.

Применение термометаллоплакирования способствует защите от износа рабочих поверхностей гребня колеса, и при этом позволяет получить дополнительное тяговое усилие за счет реализации фрикционной связи F между гребнем и боковой поверхностью головки рельса. Данное двухточечное состояние взаимодействия колеса локомотива с рельсом реализуется при вписывании в кривые, когда значительно возрастает требуемое тяговое усилие для компенсации дополнительного сопротивления прицепного подвижного состава при его движении в криволинейных участках пути, и (или) при ветровой нагрузке, и (или) при движении с толкачом. На рисунке 1 представлены рабочие поверхности модели колеса до и после термометаллаплакирования [8,9]. Снижение интенсивности изнашивания рабочих поверхностей гребней колес до нормативного уровня и ниже уровня интенсивности изнашивания поверхностей кругов катания позволяет перейти от обточки колес по причине тонкого гребня к обточке по «прокату» бандажа. Такая технологическая схема позволяет в 3…4 раза сократить затраты на обточку и в 4…5 раз увеличить ресурс колесных пар [10,11].

В результате комплексных теоретических и опытно-экспериментальных исследований была разработана технологическая схема защиты от износа рабочих поверхностей гребня колеса путем нанесения на них защитной пленки металла при реализации двухточечного контакта колеса локомотива с рельсом. Такое решение основано на незначительном превышении скорости скольжения рабочей поверхности гребня относительно рельса, но не более 0,2 % по сравнению со скоростью скольжения поверхности круга катания бандажа. Таким образом, в точке 2 создается дополнительная фрикционная связь, позволяющая на 20…25 % увеличить тяговое усилие локомотива при реализации тяги при 2-х точечном контакте.

Подводя итоги о применении технологии термометаллоплакирования стоит отметить её основные преимущества и результаты:

1. Формируемое защитное покрытие обладает более высокими, по сравнению с ближайшими аналогами, триботехническими характеристиками (пределом прочности на сдвиг, термостойкостью и др.), что позволяет снизить влияние возвышения наружного рельса и допустимых скоростей движения подвижного состава на интенсивность износа поверхностей трения трибосистемы «колесо-рельс».
2. Реализация технологии термометаллаплакирования в которой рабочим органом является гребень колеса тягового подвижного состава, позволит обеспечить эффективную защиту от бокового износа рельсов без применения других средств лубрикации и ограничений по скорости движения, имея соответственно при этом положительный экономический эффект.
3. Применение технологии на рабочих поверхностях колес локомотивов позволит исключить применение песка, в том числе и в кривых участках пути, исключить запесочивание балластной призмы и как следствие этого увеличить межремонтные сроки эксплуатации железнодорожного пути.
4. Данная технология позволяет существенно снизить интенсивность изнашивания гребней колесных пар железнодорожного подвижного состава, в первую очередь тягового, с обеспечением нормативных значений ресурсных параметров колесных пар.
5. Реализация технологии позволит эффективно реализовать рекомендации, представленные в научно-исследовательской работе 2.260 холдинга РЖД. («Экспериментальные и теоретические исследования по унификации ширины колеи в кривых малого радиуса», в частности в разделе практических рекомендаций по защите от бокового

износа рельсов). Работа была выполнена учёными РГУПСа, в 2015 году по заказу Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».

6. Технология ТМП позволяет значительно снизить затраты тяговой мощности локомотива, связанной с преодолением сил поперечного крипа.

7. Применение ТМП позволит увеличить на 20-25% тяговое усилие локомотивов при движении в кривых участках пути.

8. Технология ТМП, позволит значительно снизеть уровень шумового воздействия на окружающую среду, а также позволяет реализовать избирательное подавление амплитуд фрикционных автоколебаний при взаимодействии колеса с рельсами в режиме поперечного крипа.

9. Оболочка смазочных стержней РАПС (ТМП) является датчиком наличия смазочного материала на рабочих поверхностях бандажа колеса обеспечивая режим периодического включения подачи СМ при наступлении «смазочного голодания».

10. Технологическое оборудование ГРС и применяемые в нем смазочные стержни, позволяют увеличить ресурс разовой заправки в режиме гребнерельсосмазывания до 700 км пробега, а в режиме гребнесмазывания до 6-8 тыс. км пробега.

11. За счет применения экологически чистых расходных материалов технология термометаллоплакирования рабочих поверхностей открытых узлов трения не оказывает негативного воздействия на окружающую среду.

Библиографический список

1. Express analysis of lubricants’ properties for dynamically loaded open- and closed-loop units: XV International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems" (DTS-2019) / V. Shapovalov [et al.] // New York: AIP Conference Proceedings, 2019. – V. 2188. – pp. 7.

2. **Озябкин, А.Л.** Динамический мониторинг триботермодинамики фрикционных мобильных систем // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11. № 5. С. 644-654. DOI: 2011;11(5):644-654.

3. Application of Methods Physical and Mathematical Modeling for a Research of Nonlinear Mechanical Systems on the Example of the Rolling Stock: XV International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems" (DTS-2019) / V. Shapovalov [et al.] // New York: AIP Conference Proceedings, 2019. – Volume 2188. – pp. 020017-1020017-10.

4. Модельная оптимизация технологии контактно-ротапринтного плакирования поверхностей трения / В.В. Шаповалов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018 – №1 (197) – С. 84-90. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-1-84-90.

5. Совершенствование технологии термоформирования структуры смазочного антифрикционного материала / В.В. Шаповалов [и др.] // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. 2019 – № 3 (203) – С. 28-32. DOI: 10.17213/0321-2653-2019-3-28-32.

6. **Kokhanovsky, V.A.** A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel-Rail System / V.A. Kokhanovsky, D.V. Glazunov // JOURNAL OF FRICTION AND WEAR (2020) Vol.41 №6.

7. **Builo, S.I.** The Development of Methods for the Determination of Thermal and Tribologcal Characteristics of the Friction Surfaces. / S.I. Builo, I.V. Kolesnikov, N.A. Myasnikova // Proceedings of the 2015 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. New York, Nova Science Publishers, 2016. – P. 281–288.

8. **Kolesnikov, I.V.** Influence of segregation processes on the mechanical and tribological characteristics of materials / I.V. Kolesnikov, E.S. Novikov, S.A. Danil'chenko // Russian Engineering Research. – 2018. – Т. 38, № 9. – С. 740–741.

9. **Kolesnikov, V.I.** An Innovative Approach to the Study of Friction, Wear, and Monitoring of Heavily Loaded Tribosystems / V.I. Kolesnikov, A.L. Ozyabkin, E.S. Novikov // Friction and Wear. – 2019. – Т. 40. – No. 4. – pp. 380–388.

10. Research of Wheel-Rail Wear Due to Non-Symmetrical Loading of a Flat Car / O. V. Shatunov [et al.] // Наука та прогресс транспорту. – 2019. – № 4. – С. 102–117. – DOI: 10.15802/stp2019/177457.

11. Структурные аспекты износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий / В.И. Колесников [и др.] // Физическая мезомеханика – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 62–77. DOI: 10.24411/1683-805X-2020-11006

УДК 621.896 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_166

В.В. Шаповалов, д-р техн. наук, **Т.Л. Саямова, Д.А. Рябыш, В.Б. Мищиненко, О.И. Коваленко** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАКРЫТЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

***Аннотация**: Автомобиль состоит из многочисленных деталей сложной конструкции, в их число входит и трансмиссия. Существует достаточно большое количество разнообразных коробок передач, включая механические и виды автоматических. На сегодняшний день наиболее актуальны автоматические трансмиссии. Одно из приоритетных направлений в области развития АКПП – это исключение разрыва потока мощности при работе с силовой трансмиссией. Данный аспект можно достичь с помощью применения в АКПП муфты-шестерни. Снижение динамических нагрузок также очень важно и учитывается в ходе проектирования АКПП. Металлоплакирование в жидкой среде является эффективным методом для снижения износа рабочих поверхностей различных шлицевых соединений.*

The car consists of numerous parts of a complex design, including the transmission. There are quite a large number of different gearboxes, including mechanical and automatic types. To date, automatic transmissions are the most relevant. One of the priorities in the field of automatic transmission development is the elimination of power flow disruption when working with a power transmission. This aspect can be achieved by using a gear clutch in the automatic transmission. Reducing dynamic loads is also very important and is taken into account during the design of the automatic transmission. Metal plating in a liquid medium is an effective method to reduce the wear of the working surfaces of various splined joints.

Ключевые слова: Автоматическая коробка передач, трансмиссия, роботизированная коробка передач, вариаторная АКПП, конструкция АКПП, муфта-шестерня, поток мощности, металлоплакирование.
Keywords: Automatic transmission, transmission, robotic gearbox, variator automatic transmission, automatic transmission design, gear clutch, power flow, metal plating.

Автомобиль в современном мире является наиболее распространенным механическим транспортным средством. Современный автомобиль собирают из 15-20 тысяч деталей, среди них – 150-300 – считаются наиболее дорогостоящими и требующими колоссальных затрат в проектировании, производстве и эксплуатации. В категорию дорогих и значимых агрегатов входит и коробка передач, являющаяся неотъемлемой частью автомобиля с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Также, коробки передач получили широкое применение в различных моделях техники специального назначения.

Коробка перемены передач (КП) транспортным средствам необходима для варьирования частоты и крутящего момента на ведущих колесах в гораздо большем диапазоне, чем это может обеспечить двигатель транспортного средства.

Коробки переключения передач бывают различных видов и исполнений, классифицируются по целому ряду признаков [1,2]. Среди существующих коробок передач можно выделить следующие образцы:

- механическая коробка переключения передач;

- автоматическая гидромеханическая коробка передач;
- роботизированная коробка передач;
- вариаторная коробка передач.

При всех достоинствах и преимуществах всех представленных выше видах коробок передач они имеют целый спектр недостатков.

К недостаткам МКПП можно отнести регулярную необходимость выжимания сцепления и переключения передач водителем с помощью рычага, возможна и перегрузка двигателя, при некорректной смене передач. У гидромеханических КПП среди минусов есть повышенный расход топлива и масла в сравнении с механической и роботизированной трансмиссиями. «Роботы» страдают выходом из строя мехатроника – электронно-гидравлического блока, а также, на некоторых моделях роботизированных коробок наблюдаются дергания при переключениях с первую на вторую скорость. У вариаторных трансмиссий тоже ряд недостатков: не переносят быстрые режимы движения, требуют достаточно частую замену масла в агрегате, также, буксировка автомобиля, оснащенного CVT, возможна только на эвакуаторе или же с частичной погрузкой ведущей оси.

Переключение передач у рассмотренных выше трансмиссий происходит с значительной задержкой, что не позволяет механизмам блистать скорострельностью, поэтому перспективным направлением в области совершенствования АКПП является исключение разрыва потока мощности, что позволит увеличить скорость переключения передач транспортного средства. Такой эффект можно достичь, применив в механизме муфту-шестерню (Рис.1) [3].

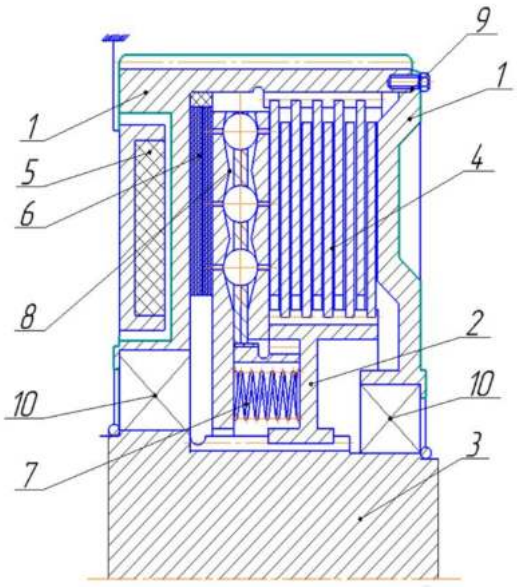


Рис. 1. Конструкция муфты-шестерни:
1 – ведущая полумуфта; *2* – ведомая полумуфта; *3* – вал; *4* – пакет фрикционных дисков; *5* – электромагнит; *6* – плавающие диски; *7* – возвратная пружина; *8* –диск включения и тела качения; *9* – болт; *10* – подшипник

Муфта-шестерня работает следующим образом: к корпусу муфты притягиваются плавающие диски, а также диск включения. Такой процесс происходит благодаря поступлению на электромагнит антирезонансного напряжения, к муфтовому корпусу притягиваются плавающие диски и диск включения. Отключение муфты-шестерни производится с помощью подачи на электромагнит резонансного динамического воздействия.

Благодаря интеграции в систему управления двух видов динамических воздействий: резонансного и антирезонансного обеспечивается гарантированное включение и отключение

муфты-шестерни. Всё это обеспечивает надежность и эффективность при минимальном уровне затрат мощности.

Динамические нагрузки на КПП возможно минимизировать с помощью включения последующей передачи, которая вращается и уже подготовлена к включению, тем самым подтверждая минимальный разрыв мощностного потока.

Важнейшим условием для эффективной работы является и вид шестерней, а также их зацепление. Наиболее высокопроизводительной является косозубая механическая передача с зацеплением Новикова. Это обусловлено тем, что данный тип зацепления снижает уровень шума, обладает более высокой нагрузочной способностью по контактным напряжениям и имеет большие передаточные числа.

Чтобы механизм нового поколения работал дольше, в конструкцию были внесены существенные изменения: был применен сдвоенный сепаратор для исключения продавливания дорожки в ходе значительных контактных нагрузок. Ввиду новой конструкции вся нагрузка рассредоточится на три шарикоподшипниковых нагружающих механизмов, тем самым продлив срок службы механизма.

На основании анализа существующих наиболее распространенных видов автоматических трансмиссий (АКПП) наземного мобильного транспорта выявлены следующие направления их совершенствования:

1) увеличение надежности;
2) повышение их эффективности, в частности увеличения КПД;
3) минимизация времени переключения передач;
4) исключение разрыва потока мощности;
5) снижение стоимости комплектующих АКПП [4-6]

Последовательно рассмотрим решение задач, определяющих пути совершенствования АКПП.

Как известно надежность фрикционных систем, работающих в режиме сухого трения, можно резко повысить путем перехода от сухого трения к жидкостному [7-9].

Повышение надежности АКПП увеличивает путем введения в жидкую среду смазочный материал металлоплакирующих функциональных присадок. В качестве таких присадок используют низкоуглеродистые (мягкие стали), медностальные, медноалюминиевые, цинкоалюминиевые и другие сплавы. Трибологические характеристики рабочих поверхностей, например, шлицевые соединения, нагружающие дорожки механизма нагружения муфты-шестерни, рабочие поверхности плавающих дисков фрикционного усилителя формируются за счет пористости формируемого металлопокрытия.

Металлоплакирование покрытия и насыщение пор покрытия смазочным материалом. С целью обеспечения постоянства состава смазочной композиции, состоящей из базового масла и металлоплакирующих фрикционных присадок, а также для обеспечения эффективной работы смазочного материала и защиты от износа рабочих поверхностей закрытых и открытых узлов трения, необходимо применять металлоплакирующие присадки, имеющие удельный вес равный удельному весу базового масла.

При помощи технологии металлоплакирования в жидкой среде мы имеем возможность повысить износостойкость высоко нагруженных узлов трения, снизить вероятность их деформирования, увеличить фактическую площадь касания, что позволяет в свою очередь уменьшить контактные нагрузки. Для того чтобы система работала эффективно, необходимо обеспечить стабильность смазочного материала, решение данной задачи производится путем выравнивания удельного веса функциональной присадки удельному весу жидкой основы смазочного материала. Функциональная присадка включает в себя мелкодисперсный порошок алюминия (Al), который смешивается в определенном соотношении с порошком легкого металла, с минимальной плотностью среди твердых элементов.

В силу низкой плотности, материал не тонет в воде, бензине и керосине. Показатели характеристик могут меняться, в зависимости от влажности воздуха и температуры окружающей среды. Плотность вещества зависит от температуры. Теплоемкость материала напротив, слабо зависит от этого воздействия [6,7].

В результате высокочастотного малоамплитудного относительного (реверсивного) движения стакана и наконечника на рабочих поверхностях шлицевого соединения возникают условия для реализации их износа в виде фреттинг-коррозии. Очевидно, причиной фреттинга является реверсивное высокочастотное относительное смещение с амплитудой, не превышающей 0,3 мм. В свою очередь, применяемое для разделения рабочих поверхностей шлицевого соединения стакана и наконечника масло активно формирует в процессе реверсивного низкоамплитудного высокочастотного взаимодействия контактирующих поверхностей и микротурбулентных процессов смазочную пленку, состоящую из присадок и элементов-пассиваторов, прежде всего кислорода, присутствующего в гипоидном масле в молекулярном и химически связанном видах. В связи с этим в процессе относительного смещения металлических поверхностей, особенно в реверсивном движении в масле происходит активация кислорода. Предлагается с целью снижения интенсивности фреттингового окисления в состав смазочного материала в определенном оптимизированном соотношении ввести порошок сплава алюминия с размером частиц 30 мкм, с целью уравнять удельные веса функциональной присадки и смазочного материала для обеспечения металлоплакирования в жидкой среде.

Как было сказано выше, если в смазочный материал в определенном количестве добавить мелкодисперсный порошок алюминия и другого лёгкого металла, то наличие кислотных и основных центров на поверхности оксида алюминия будет способствовать более прочной адсорбции присадок из объема смазочного материала, и, следовательно, повышению триботехнических свойств масла.

В результате деформации в нормальном направлении фрагменты оболочки частиц Al в виде Al_2O_3 распределяются по поверхности плоской чешуйки Al в соотношении $\frac{S_{Al}}{S_{Al_2O_3}} = 10^3$. Данное соотношение позволяет реализовать условия плакирования Al поверхностей шлицевого соединения за счет превышения сил адгезии Al с Fe, величина которых значительно ниже сил когезии в объеме Al. Ювенильная (неокисленная) поверхность закрепленной частицы Al в результате реверсивного нагруженного относительного движения рабочих поверхностей шлицевого соединения активно окисляется кислородом, $4Al+3O_2 = 2Al_2O_3$. Данный кислород поступает из гипоидного масла, что снижает интенсивность коррозии рабочих поверхностей шлицевого соединения. В свою очередь, образование на рабочих поверхностях высокопрочной ($h \approx 0{,}1$ нм) нанопленки Al_2O_3 эффективно защищает от фреттинга (усталостных разрушений) рабочие поверхности шлицевых соединений АКПП.

Нанопленки закрепляются на шлицах стакана или наконечника при пульсации нагрузки от 100 МПа до 0, преимущественно в местах аномального изнашивания. Данное явление возникает из-за так называемого «краевого эффекта», связанного с перекосом контактирующих рабочих поверхностей шлицевого соединения [8,9].

Представленные в работе «Теоретические основы металлоплакирования тяжелонагруженных узлов трения в жидкой среде» квантово-химические расчеты когезии и адгезии в системах, содержащих элементы *Fe, Al,* позволили сделать вывод, что в системе слоев (*Fe, Fe*), (*Fe, Al*), (*Al, Al*), (*Al, AlO_2*) прочность химических связей последовательно уменьшается. Это означает, что в процессе трения наружный слой (*Al, AlO_2*) может служить первичной смазкой. При его истирании роль смазки будут последовательно выполнять следующие слои, предохраняя железо от разрушения.

Для проведения эксперимента со шлицевыми соединениями АКПП применялось масло стандарта API GL-5.

Аналогичным способом, применения металлоплакирующих присадок, в составе которых находятся мелкодисперсный порошок алюминия и другого лёгкого металла, положительно проявят себя и на сети дорог ОАО «РЖД», в качестве компонента жидких, полужидких или консистентных смазочных материалов, применяемых для лубрикации контакта гребня колеса и головки рельса. Данные виды смазочных материалов применяются в таких устройствах как стационарные лубрикаторы, вагоны-рельсосмазыватели, локомотивы-рельсосмазыватели, бортовые дистанционные лубрикаторы и т.п. В некоторых из этих систем

существует проблема выпадения в осадок компонентов смазочных материалов, так, например, в стационарных путевых рельсосмазывателях на дне ёмкости для смазочного материала может образовываться осадок, который негативно влияет на дозированное нанесение защитного слоя на поверхности трения. В следствии засорения каналов или форсунок подача материала не происходит вовсе или же, засорённая форсунка производит распыление не в заданную область, что приводит к замасливанию балластной призмы, а также находящегося рядом оборудования.

С целью предотвращения таких негативных последствий, в составе смазочного материала, осуществляющего лубрикацию зоны контакта гребень колеса - головка рельса, возможно использование функциональных металлоплакирующих присадок сплавов алюминия с лёгкими металлами в виде мелкодисперсных порошков, оптимизированных по составу и массовой доле по отношению к смазочному материалу. Данная стабильность для оптимизированных составов, обеспечивается путём выравнивания удельных весов материалов функциональной присадки и масла при использовании оптимального размера частиц алюминиевого сплава, посредством чего формирование осадка в смазочной композиции, в статическом состоянии, проявляется только через 360 суток, что значительно выше, чем у применяемых смазочных композиций.

При проведении испытаний по металлоплакированию в жидкой среде, была обеспечена стабильность функциональной присадки и смазочного материала, без выпадения в осадок, на рабочих поверхностях получили защитный слой в виде равномерного алюминиевого тонкого покрытия, который обладает высокими нагрузочными характеристиками, исключающими деформации при краевых явлениях, связанных с перекосом. Данный эффект позволяет бороться с фреттинг-коррозией, исключая динамическое взаимодействие рабочих поверхностей, за счет того, что происходит разделение рабочих поверхностей третим телом, которое воспринимает на себя микроперемещения, связанные с фреттингом.

Библиографический список

1. **Петров, А.П.** Современные конструкции автоматических коробок передач / А.П. Петров // Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2015. – 80 с.

2. **Харитонов, С.А.** Автоматические коробки передач / С.А. Харитонов // Москва: ООО «Изнательство Астрель», 2003. – 335 с.

3. **Шаповалов, В.В.** «Совершенствование силовых трансмиссий специализированного подвижного состава на базе динамической анизотропии фрикционного контакта» / В.В. Шаповалов.

4. **Гришкевич, А.И.** Проектирование трансмиссий автомобилей / А.И. Гришкевич, Г.Ф. Брусел // Москва: Машиностроение, 1984. – 272 с.

5. **Erjavec, J.** «Automatic Transmissions» / J. Erjavec // Delmar: Cengage Learning, 2005. – 1648 с.

6. **Шаповалов, В.В.** «Применение методов физико-математического моделирования и трибоспектральной идентификации для мониторинга фрикционных механических систем» / В.В. Шаповалов // Москва: Вестник машиностроения, 2009. – 57 с.

7. Express analysis of lubricants' properties for dynamically loaded open- and closed-loop units: XV International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems" (DTS-2019) / V. Shapovalov [et al.] // New York: AIP Conference Proceedings, 2019. – V. 2188. – pp. 7.

8. **Озябкин, А.Л.** Динамический мониторинг триботермодинамики фрикционных мобильных систем // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11. № 5. С. 644-654. DOI: 2011;11(5):644-654.

9. Application of Methods Physical and Mathematical Modeling for a Research of Nonlinear Mechanical Systems on the Example of the Rolling Stock: XV International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems" (DTS-2019) / V. Shapovalov [et al.] // New York: AIP Conference Proceedings, 2019. – Volume 2188. – pp. 020017-1…020017-10.

СЕКЦИЯ 3.
Проблемы трения, износа и смазочных материалов

УДК 620.1; 625.032.3; 531.46 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_171

J.C. Vélez, J.A. Carlos Cornelio (Tribology and Surfaces Group, Universidad Nacional de Colombia), **R. Buitrago-Sierra** (Grupo de Investigación Materiales Avanzados y Energía – MATyER. Instituto Tecnológico Metropolitano), **J.F. Santa** (Tribology and Surfaces Group, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Grupo de Investigación Materiales Avanzados y Energía – MATyER. Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín), **L.M. Hoyos-Palacio** (Grupo en Biología de Sistemas, Universidad Pontificia Bolivariana), **J.S. Rudas** (Grupo de Investigación e Innovación en Energía – GIIEN. Institución Universitaria Pascual Bravo), **A. Toro** (Tribology and Surfaces Group, Universidad Nacional de Colombia), **R. Nevshupa** (Spanish National Research Council, IETCC-CSIC)

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF COMPOSITE FRICTION NANOMODIFIERS FOR A WHEEL-RAIL CONTACT

Abstract. *Composite friction modifiers (CFM) of a vinyl ester matrix reinforced with molybdenum disulphide and carbon nanotubes were developed, and their potential use for wheel-rail contact were studied under rolling-sliding conditions in a twin-disk testing machine. The tests were performed using 0.5, 1, 2, 3 y 5% of slip and pressure of 1.1 GPa. After the tribological test, the phenomenon of gas triboemission from the CFM samples was analyzed. The results indicated that the presence of carbon nanotubes leads to a decrease in both friction coefficient and wear rate. The safety aspects of CFM related to generation of nanoparticle aerosols were also addressed.*

Keywords: Friction modifiers; Composite; Carbon nanotubes; Top-on-rail

1. Introduction

Wear of railway systems costs millions of dollars around the world. The total annuity cost/meter for rail maintenance of a non-lubricated 12 MGT transportation system is US$ 54, which can be as high as US $ 1.5 Million a year for a 30 km line [1]. Furthermore, environmental changes caused by wear and creepage (mostly noise) are also an issue due to their impact on the community. A worldwide approach to deal with wear problems is the use of lubricants and friction modifiers for the interface between the wheels and the rails. A friction modifier (FM) is a substance deliberately added as a layer into the wheel and rail contact. There are three categories of friction modifiers [2]: Low-friction modifiers (COF < 0.2), High-friction modifiers (COF from 0.2 to 0.4) and very high friction modifiers or friction enhancers (applied to increase adhesion, COF >0.4). The products can be used as solid bar (sticks) applied to the flange of the wheel or the rail to be transferred to the counter body when the wheel rotates. The use of solid lubricants reduces wear of rails and wheels and minimize the migration of lubricant away from the wheel flange [3]. Some authors have studied the effect of solid lubricants on wear of wheel and rail materials [4-9]. The solid lubricants are used to control short pitch corrugation [10] and noise [11]. One of the advantages of lubricant bars are that they do not collect or retain abrasives found on the rails such as oil, water, sand, steel particles and solid residues in general [4]. Even though the use of solid bars as friction modifiers is commercially available for the wheel-rail contact, the discussion of their chemical and tribological properties is almost inexistent in the literature. Fletcher and Beynon [12], for instance, tested solid bars under rolling sliding conditions but the chemical composition of the bars was not informed in their article. Moreover, few studies are available related to the application of nanotechnology to friction modifiers.

Several authors have studied Carbon Nanotubes (CNT) in lubricants. However, the use of CNT for oils and solid lubricants for the wheel-rail contact is still under development.

Carbon nanotubes (CNT) are solid lubricants with outstanding electrical, optical and mechanical properties. C.S. Chen et al [13] reported the tribological properties of a lubricant doped with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) modified with stearic acid (SA) by using a pin-on-plate testing machine. The results indicated that the modification led to an improvement in the dispersion of the MWCNTs and their properties as lubricant additives. In other work, Khalil et al. [14] studied the tribological properties of two lubricating oils, by using MWCNTs as additives at different concentrations (0.1, 0.5, 1 and 2% wt. %). Friction and wear experiments were performed using a four-ball tribometer. The results showed that the addition of MWCNTs to the oils reduced the coefficient of friction and provided anti-wear properties. The authors found a decrease in wear between 39 and 68% and friction between 49% and 57% in the case of mineral oil doped with MWCNTs compared to commercial oils. Cornelio et al. [15] evaluated the tribological properties of single wall (SWCNTs) and MWCNTs functionalized with carboxylic acid as lubricant additives dispersed in oil at different concentrations (0.01, 0.05%) under rolling-sliding conditions in a twin-disc testing machine. The results indicated that the presence of carbon nanotubes led to a decrease in the coefficient of friction and in the wear rate.

In this work, solid lubricant bars were developed in the laboratory and modified by using original carbon nanotubes. The aim was to decrease the wear rates of materials for wheels and rails while maintaining a controlled coefficient of friction within the acceptable ranges for railway systems [16].

2. Experimental

Commercial molybdenum disulfide (MoS_2, OKS 100) was purchased from Molytec LTDA. Pure vinyl ester resine 805 and catalyst were obtained from Protokimica SAS. The resin was mixed with MoS_2 and the carbon nanotubes under vigorous agitation. Then the catalyst was rapidly added to the resin maintaining a Catalyst weight/Resin weight ratio of 8/100. Finally, the mixture was left in a cast at 80 °C in a water bath for 24 hours. Table 1 shows the amount of the additives for every bar. CNT's were synthesized by chemical vapor deposition. A furnace with high precision temperature control and equipped with a quartz tube was used to grow CNT's at 700 °C. Acetylene was used as carbon source. Nickel was employed as catalyst to produce MWCNT's. The gas mixture was composed of 80 cc/min nitrogen, 20 cc/min acetylene and 15 cc/min hydrogen. The processing sequence included reduction time of 20 min, acetylene time of 30 min and cooling time of 60 min.

The microstructure and chemical composition of carbon nanotubes (CNTs) and commercial molybdenum disulphide were studied by SEM, TEM and RAMAN. JEOL JSM-6490LV and JEOL 7100F FEG scanning electron microscopes used were used, as well as a Tecnai F20 Super Twin TMP Transmission electron microscope (TEM). Raman Spectroscopy was carried out using a Horman Jobin Y von confocal Raman spectrometer, Labram HR high resolution model with a focal length of 800 mm, Laser spot size from 1 to 300 mm, CCD detector with a resolution of 1024×256 pixels, optimized spectral range of 400-1100 nm and diffraction gratings of 1800 and 600 lines/m.

Twin-disc tests were performed to study the effect of the use of the lubricant bars on the tribological response of materials from wheels and rails. The wheel samples were extracted from an ER8 wheel according to EN 13262 standard. The rail samples were extracted from the head of a R400HT rail. The chemical compositions of the wheel and the rail obtained by Optical Emission Spectrometry in a Shimadzu OES 5500 Spectrometer are shown in Table 1. The average roughness (Ra) of the test samples was between 0.5 and 1.1 μm in all cases and it was measured using a portable roughness tester Mitutoyo SJ-201.

Mechanically Stimulated Gas Emission Spectrometry (MSGE-MS) was employed to explore tribochemical reactions *operando*. A special ultrahigh vacuum system equiped with a vacuum friction

cell, mass-spectrometer and a dynamic gas expansion system was used. The system and procedure are explained in details elsewhere [17-19].

3. Results and discussion

Figure 1 shows a schematic of the test rig and a detail of the setup to lubricate the contact area with the bars. The twin-disc machine has been widely used to simulate wheel-rail systems given that the test velocity, contact pressure and creepage can be precisely controlled. In this work, the pressure was fixed at 1.1 GPa and different creepage values were used to obtain the creep curves (coefficient of traction against creepage). The coefficient of traction after achieving a stable regime for a fixed creepage is recorded. The complete curve is obtained after performing several independent tests for different creepages. Every point of the creep curve is obtained after three replicas. During the tests, the material from the lubricant bars was transferred to the rail sample thanks to the application of a normal load by dead weight. The creep curves of developed bars, commercial bars and under dry conditions were compared.

Table 1

Chemical composition of materials (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
Rail R400HT	0.931	0.251	1.269	0.009	0.022	0.275
Wheel E8	0.542	0.253	0.734	0.011	0.006	0.141
	Al	**V**	**Cu**	**Ti**	**Ni**	**Mo**
Rail R400HT	-	0.0035	0.017	0.002	0.015	0.0068
Wheel E8	0.027	0.006	0.165	0.002	0.120	0.048

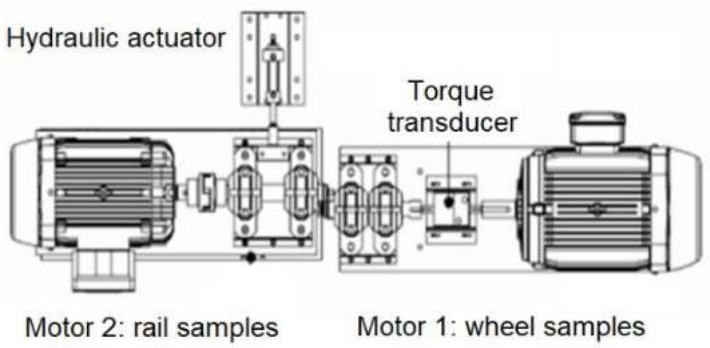


Fig. 1. Schematic of the experimental setup

Figure 2 shows SEM images of grown CNT's with Ni catalyst. From the image a mixture of carbon nanotubes and catalysts residues can be observed. Figure 4b shows the Raman spectrum of the CNT. The spectrum shows the three characteristic peaks related to the formation of CNT's, i.e. the D band at ~1340 cm^{-1}, which corresponds to the phonon mode induced by disorder (A1g), the G band at ~1580 cm^{-1} assigned to the phonon mode allowed by Raman (E2g) and the band G´ at ~2660 cm^{-1} assigned to the first overtone of mode D. The D/G band intensity ratio (ID/IG) increases with increasing structural disorder. The G´/G band intensity ratio (IG´/IG) increases as the long-range order of C deposits is increased. From the band ratios, the ID/IG ratio value is 0.84, indicating that fewer defects are present in the sample, while the IG´/IG ratio is 1.68, indicating a greater long-range alignment. TEM image (Figure 4 c) indicates that the obtained CNT are of the multiple walls type (MWCNT) since the central opening is clearly observed. The CNT exhibit a high degree of crystallinity considering that the carbon layers are highly aligned.

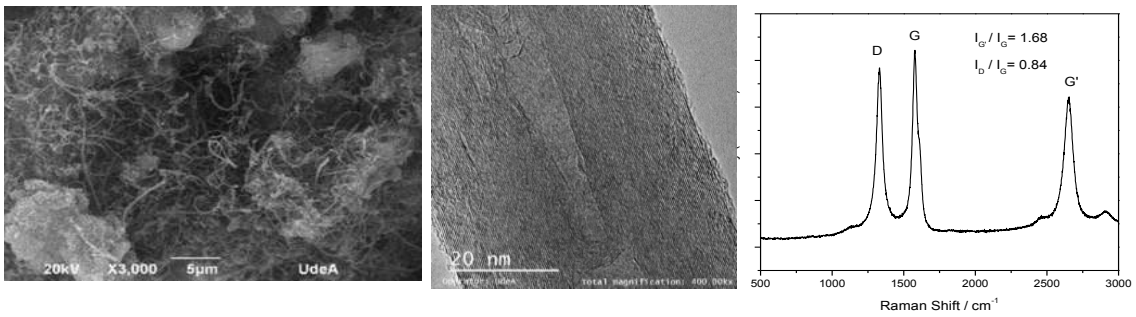


Fig. 2. SEM images of the synthesized CNT and the corresponding Raman spectrum

Figure 3 (left) shows the creep curves for the tests carried out with the lubricant bars (Commercial, MoS_2 and $_{MoS2}$ + CNT) and also for the dry condition. In all cases the use of the solid lubricant reduces the COT in more than 10% when compared to the dry test. Once the COT stabilizes (for creepages higher than 3%) the lower value is obtained with the MoS_2 + CNT bar followed by the commercial bar, MoS2 bar and dry condition. This result is very interesting since the content of MoS_2 in both the MoS_2 and MoS_2 + CNT bars is just 20 wt.%, which is half of the amount found on the commercial bar. It is worth noticing that for low creepages the COT of the developed bars is higher than that of the commercial bar. This result is desirable in the field since the aim with friction modifiers is to keep the COT within a precise range instead of reducing it to very low values.

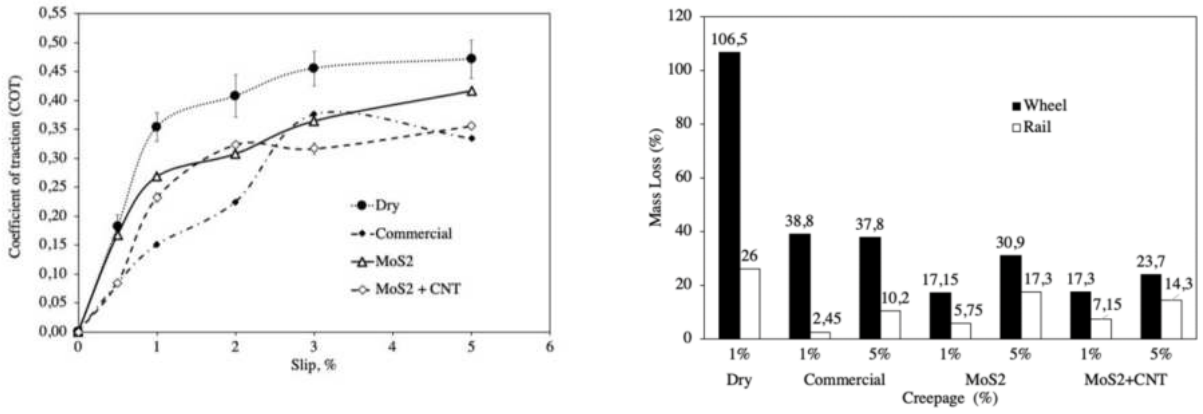


Fig. 3. Coefficient of traction as function of slip for various friction modifiers (left); Mass losses in various wear tests (right)

Figure 3 (right) shows the mass losses for the wheel and the rail samples under 1 and 5% creepage. In all cases the higher mass losses were found for the dry conditions. The results of mass losses for the wheel and the rail for tests with 5% of creepage are expected to be higher. In all cases, the mass loss of the rail and wheel samples are higher in the tests carried out with the commercial bar. The lowest mass loss for tests under 5% of creepage was found for the bars with CNT's. The use of the lubricant bars reduces the mass loss of the samples since abrasive and adhesive wear mechanisms are hindered.

Figure 4 shows the aspect of the material layers transferred to the surface of the wheel and rail samples. The proposed mechanism of layer formation is as follows: first, the rail sample causes abrasion to the solid lubricant bar and detaches material from it. The temperature at the contact helps softening the polymer matrix, so the transferred layer covers the irregularities at the surface of the rail sample. This reduces the COT since a material with lower shear resistance is added to the contact. Subsequently, the material is transferred to the wheel sample due to the creepage imposed during the tests.

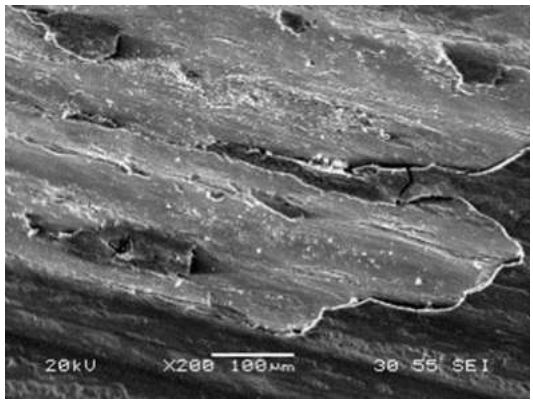


Fig. 4. A transfer layer on the samples with CNT

A differential mass-spectrum obtained during rubbing of a friction modifier bar doped with CNT and MoS_2 is shown in Fig. 5. The ion components could be undoubtedly assigned to CS_2 and COS precursors. This was striking since none of these gases is usually formed during pyrolysis or thermal oxidation of metal hydrides (FeS_2, MoS_2, etc.) alone or together with any carbonaceous materials. This findings points at tribochemical reactions, which yield such gaseous products. The role of tribochemical reactions should be further elucidated since they can be responsible for the improvement of tribological performance of steel-steel sliding-rolling contact under solid lubrication.

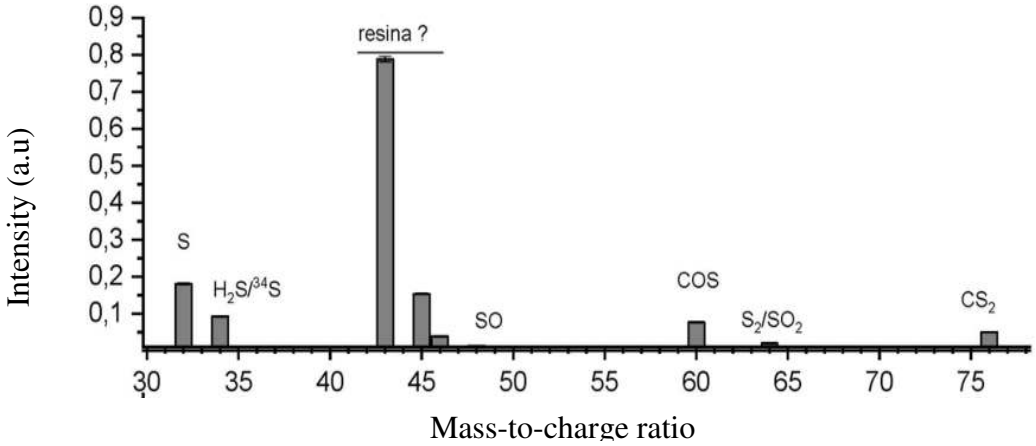


Fig. 5. Differential mass-spectrum of the gases emitted during rubbing of friction modifier with CNT and MoS_2 additives

4. Conclusions

Solid lubricant bars for application at the wheel-rail interface were developed and their tribological behavior was studied and compared to that of a commercial bar. The commercial bars are composed of a thermoset resin with 47% of solid additives. The developed bars had lower solid additives (20%) when compared to the commercial bar (47%). The coefficient of traction of samples tested with lubricant bars was lower than that reported for the dry conditions. The coefficient of traction for low creepages (lower than 2%) is in all cases higher than for commercial one. For high values (higher than 3%), the values are very similar. The highest mass losses were found for the dry conditions. The lowest mass losses for tests under 5% of creepage was found for the bars with CNT. However, the manufactured bars showed lower mass losses for the rail when they are compared to the commercial bar. The solid bars form a uniform layer onto the rail. The layer covers the irregularities at the surface of the rail sample, and it reduces the COT since a material with a low-shear resistance is added to the contact. The layer is formed progressively in the valleys of the irregularities at the surface of the wheel. Unusual gaseous emission of CS_2 and COS was detected, when the friction modifiers with both CNT and MoS_2 additives was used in the friction test. These gases can be related to tribochemical reactions, which role in the improvement of tribological performance of solid lubricant should be further elucidated.

5. Acknowledgments

The authors are grateful to CSIC (Project COOPB20363) and MINECO (Project PID2019-111063RB-I00) for financial support, and to the Metro de Medellín for providing rails and wheels for the study.

Bibliographic list

1. Modelling and analysis of rail maintenance cost / V. Reddy [et al.] // International Journal of Production Economics. – 2007. – Т. 105, № 2. – С. 475-482.

2. **Harmon, M.** Review of top of rail friction modifier tribology / M. Harmon, R. Lewis // Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces. – 2016. – Т. 10, № 3. – С. 150-162.

3. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail–wheel test rig evaluation, analysis and modelling / D.T. Eadie [et al.] // Wear. 2008. – Т. 265, № 9. – С. 1222-1230.

4. **Beagley, T.M.** Wheel/rail adhesion—Boundary lubrication by oily fluids / T.M. Beagley, I.J. McEwen, C. Pritchard // Wear. – 1975. – Т. 31, № 1. – С. 77-88.

5. **Farr, J.P.G.** Molybdenum disulphide in lubrication. A review / J.P.G. Farr // Wear. – 1975. – Т. 35, № 1. – С. 1-22.

6. **Gunda, R.K.** Evaluation of friction and wear characteristics of electrostatic solid lubricant at different sliding conditions / R.K. Gunda, S.K.R. Narala // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Т. 332. – С. 341-350.

7. **Morimoto, T.** Effect of molybdenum disulphide upon the friction and wear in ceramic–steel pair / T. Morimoto // Tribology International. – 1997. – Т. 30, № 12. – С. 871-879.

8. **Panaioti, V.A.** Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants / V.A. Panaioti, Y.S. Asadova, M.V. Nemenko // Russian Engineering Research. – 2018. – Т. 38, № 6. – С. 493-497.

9. **Winer, W.O.** Molybdenum disulfide as a lubricant: A review of the fundamental knowledge / W.O. Winer // Wear. – 1967. – Т. 10, № 6. – С. 422-452.

10. **Eadie, D.T.** The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena / D.T. Eadie, J. Kalousek, K.C. Chiddick // Wear. – 2002. – Т. 253, № 1. – С. 185-192.

11. Friction Management as a Sustainable Solution for Controlling Noise at the Wheel-Rail Interface: Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems / R. Stock [et al.] // Cham: Springer International Publishing, 2018. – С. 723-734.

12. **Fletcher, D.I.** The influence of lubricant type on rolling contact fatigue of pearlitic rail steel / D.I. Fletcher, J.H. Beynon // Tribology Series / Dowson D. и др.Elsevier, 1999. – С. 299-310.

13. Modification of multi-walled carbon nanotubes with fatty acid and their tribological properties as lubricant additive / C.S. Chen [et al.] // Carbon. – 2005. – Т. 43, № 8. – С. 1660-1666.

14. Tribological properties of dispersed carbon nanotubes in lubricant / W. Khalil [et al.] // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2016. – Т. 24, № 7. – С. 479-485.

15. Tribological properties of carbon nanotubes as lubricant additive in oil and water for a wheel–rail system / J.A.C. Cornelio [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2016. – Т. 5, № 1. – С. 68-76.

16. Development of a composite friction modifier with carbon nanotubes for applications at the wheel–rail interface / J.C. Vélez [et al.] // Advanced Composites Letters. – 2020. – Т. 29.

17. TriDes – a New Tool for the Design, Development and Non-Destructive Evaluation of Advanced Construction Steels / R.A. Nevshupa [et al.] // Materiales de Construcción. – 2016. – Т. 66, № 324. – С. e099.

18. Ultrahigh vacuum system for advanced tribology studies: Design principles and applications / R.A. Nevshupa [et al.] // Tribology International. – 2015. – Т. 86. – С. 28-35.

19. Probing the tribochemical degradation of hydrogenated amorphous carbon using mechanically stimulated gas emission spectroscopy / A. Rusanov [et al.] // Carbon. – 2015. – Т. 81. – С. 788-799.

УДК 621.892: 547.922 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_177

М.В. Бойко, канд. техн. наук, **И.В. Колесников,** проф. РАН, д-р техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения), **С.Ф. Ермаков,** д-р техн. наук (Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины), **А.А. Бичеров** (Ростовский государственный университет путей сообщения, Южный федеральный университет)

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРИСАДКАМИ

Аннотация. *В работе изучено влияние жидкокристаллических соединений холестерина на свойства граничных слоев, формируемых при трении в вазелиновом масле. Показано, что в зависимости от химической природы, присадки изменяют разные триботехнические свойства смазочного материала. Добавление холестерилхлорида способствует формированию смазывающих пленок органической природы, прочно химически связанных с поверхностью металла и повышающих максимальную нагрузочную способность масла. Сложные эфиры холестерина образуют на поверхностях трения планарно ориентированный слой и повышают антифрикционные свойства смазочного материала. Совместное применение различных типов жидкокристаллических присадок позволяет формировать многослойные граничные слои, одновременно повышающие антифрикционные свойства и максимальную нагрузочную способность смазочного материала.*

The paper studies the effect of liquid crystal cholesterol compounds on the properties of boundary layers formed by friction in vaseline oil. It is shown that depending on the chemical nature, additives change different tribotechnical properties of the lubricant. The addition of cholesterol chloride contributes to the formation of lubricating films of organic nature, which are strongly chemically bonded to the metal surface and increase the maximum loading capacity of the oil. Cholesterol esters form a planar oriented layer on the friction surfaces and increase the antifriction properties of the lubricant. The combined use of various types of liquid crystal additives allows the formation of multilayer boundary layers, simultaneously increasing the antifriction properties and maximum load capacity of the lubricant.

Ключевые слова: граничная смазка, коэффициент трения, минеральное масло, жидкокристаллические присадки, эфиры холестерина, холестерил хлористый.
Keywords: boundary lubrication, coefficient of friction, mineral oil, liquid crystal additives, cholesterol esters, cholesterol chloride.

Граничная смазка имеет решающее значение в обеспечении работоспособности узлов трения машин и механизмов. Ее эффективность определяет износ и вероятность заедания трущихся деталей [1-3]. Многие смазочные материалы, разработанные эмпирическим путем, включают химические вещества, функция которых заключается исключительно в улучшении их смазывающих свойств при граничном режиме трения [2, 4]. Несмотря на большое число исследований, граничная смазка все еще недостаточно изучена. Отчасти это связано с большим количеством процессов, протекающих между металлами трущихся тел, компонентами смазочного материала и окружающей средой [5, 6]. В результате таких взаимодействий формируются граничные смазывающие пленки.

Установлено, что полярность присадок оказывает существенное влияние на состав и структуру граничных пленок. Так, молекулы полярных присадок в неполярных базовых маслах при взаимодействии со стальной поверхностью проявляют эффект обогащения в области контакта Герца [7]. Это повышает пленкообразующую способность смазочного материала и приводит к существенному снижению коэффициентов трения. Упорядоченное

расположение молекул присадок является еще одной причиной повышения антифрикционных свойств смазочных материалов.

Одним из способов снижения трения при использовании минеральных масел является их модифицирование жидкокристаллическими эфирами холестерина [8]. Отличительной особенностью таких присадок является полярность их молекул и способность ориентироваться с учетом морфологии поверхности трения. Добавление в смазочный материал холестерических и нематических жидких кристаллов приводит к образованию планарной текстуры граничных смазывающих слоев [9].

Существенным недостатком использования жидкокристаллических эфиров холестерина является то, что такие граничные пленки связаны с металлом только лишь силами физической адсорбции, в то время как наибольшее улучшение триботехнических свойств смазочных материалов наблюдается в случае химически связанных с поверхностью трения смазывающих слоев («полимеров трения») [10].

Целью данной работы являлось исследование процессов образования граничных слоев в вазелиновом масле в присутствии различных типов жидкокристаллических присадок.

Материалы и методы

Испытания смазочных материалов проводили на машине трения торцевого типа по схеме «три пальца по диску». Пальцы и диски были изготовлены из стали марки 40х13, Ra = 0,6÷0,8. Диаметр каждого пальца составлял 10 мм, расстояние от центра диска до середины дорожки трения было 35 мм. Нагрузка повышалась ступенчато на 1,0 МПа каждые 30 мин, скорость скольжения составляла 0,5 м/с. Измеряли изменение коэффициентов трения.

Химические связи фрагментов органических молекул с металлической поверхностью при трении исследовали методом ИК-Фурье спектроскопии с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) на приборе Nicolet 380.

В качестве базового масла использовали вазелиновое масло, присадки – холестерил хлористый (Х-26) и холестериловый эфир стеариновой кислоты (Х-18).

Результаты и их обсуждение

Трибологические испытания вазелинового масла, модифицированного жидкокристаллическими присадками, рисунок 1, позволили установить, что механизмы влияния изученных веществ на процесс образования граничных слоев различаются. Добавление холестерилового эфира стеариновой кислоты Х-18 повышает антифрикционные свойства масла, трибограмма 2 на рисунке 1. В тоже время, модифицирование вазелинового масла холестерилхлоридом Х- 26, несмотря на высокие коэффициенты трения при нагрузках 1 – 3 МПа, способствует повышению максимальной нагрузочной способности и антифрикционных свойств смазочного материала при нагрузках 4 и 5 МПа, трибограмма 3 на рисунке 1. Синергетический эффект при совместном применении присадок Х-18 и Х-26 выражается в возрастании максимальной нагрузочной способности смазочного материала одновременно с хорошими антифрикционными свойствами при низких нагрузках, трибограмма 4 на рисунке 1.

Исследование процессов взаимодействия компонентов смазочных материалов с поверхностью металла при образовании граничных смазывающих слоев проводили методом ИК-спектроскопии НПВО. Спектры поверхностей трения, сформированных в вазелиновом масле в присутствии жидкокристаллических присадок Х-18 и Х-26, приведены на рисунке 2. Перед проведением исследований излишки масла с поверхности трения убирали обработкой небольшим количеством бензина.

ИК-спектр поверхности трения, сформированной в вазелиновом масле с присадкой Х-18, не отличается от спектра поверхности чистого металла. Так как эфир холестерина образует граничные пленки за счет сил физической адсорбции, то такие слои легко удаляются с поверхности трения.

В тоже время в ИК-спектре граничной пленки, сформированной в присутствии Х-26, спектр 2 на рисунке 2, отчетливо видны полосы поглощения валентных колебаний связей С-

Н при 3000÷2800 см$^{-1}$ и деформационных колебаний групп CH_2 и CH_3 при 1350÷1450 см$^{-1}$. Эти данные свидетельствует о том, что граничная пленка состоит из углеводородных фрагментов, прочно химически связанных с поверхностью трения.

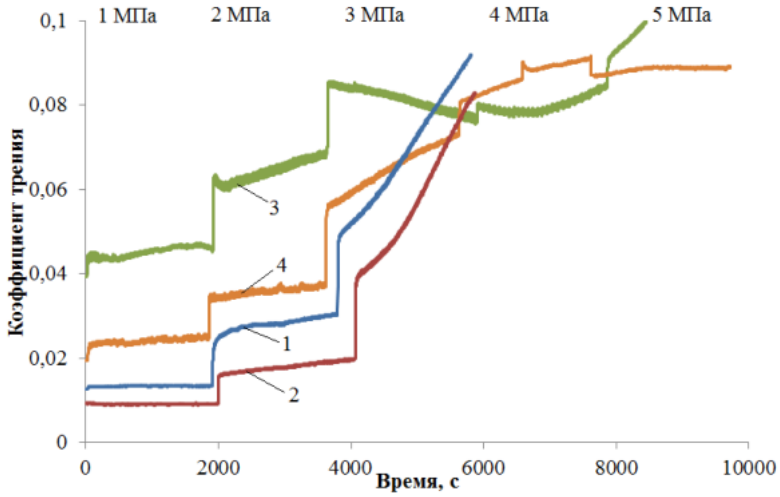


Рис. 1. Трибограммы: *1* – вазелинового масла, *2* – вазелиновое масло + 3% Х-18, *3* – вазелиновое масло + 3% Х-26, *4* – вазелиновое масло + 3% Х-18 + 3% Х-26

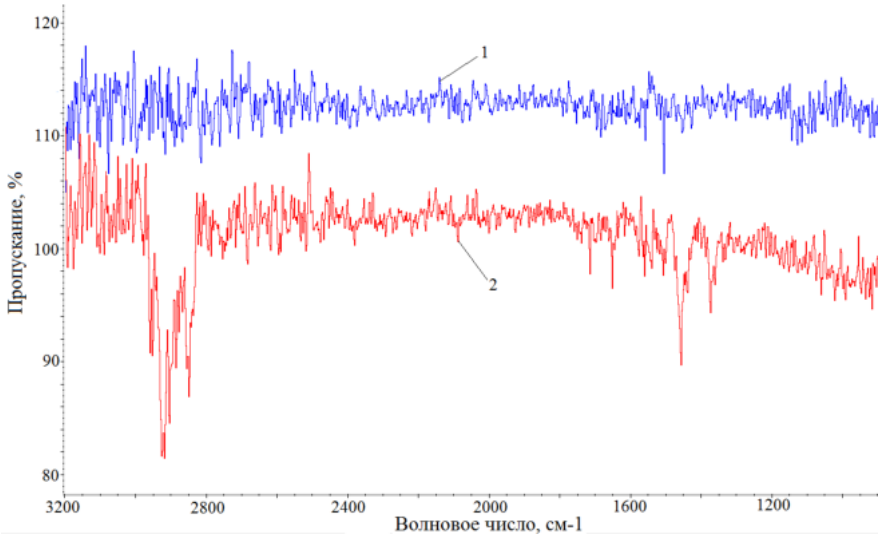


Рис. 2. ИК спектры поверхностей трения, сформированных в вазелиновом масле, модифицированном жидкокристаллическими присадками *1* – 3 % Х-18, *2* – 3 % Х-26

Для изучения строения граничной пленки, сформированной в вазелиновом масле, содержащем 3% Х-18 и 3% Х-26, рисунок 3, смазочный материал удаляли послойно промакиванием фильтровальной бумагой.

В спектре 1 на рисунке 3 помимо полос поглощения связей углеводородов при 3000÷2800 см$^{-1}$ и 1350÷1450 см$^{-1}$ присутствуют полосы валентных колебаний связей группы С=О при 1734 см$^{-1}$ и группы С-О при 1162 см$^{-1}$. Эти группы входят в состав жидкокристаллической присадки Х-26.

При дальнейшем удалении слоев смазочного материала, спектр 2 на рис. 3, полосы поглощения сложноэфирных групп исчезают и на поверхности остаются только углеводородные фрагменты. Таким образом, граничная пленка, сформированная в вазелиновом масле, содержащем 3% Х-18 и 3% Х-26, является многослойной. К металлу прилегает химически связанный слой из углеводородных фрагментов масла и

жидкокристаллических присадок. Поверх этой пленки расположен планарно ориентированный слой, состоящий из молекул присадки Х-18. Такое строение граничного слоя обеспечивает одновременное повышение нагрузочной способности и антифрикционных свойств смазочного материала, что отражается на трибограмме 4 на рисунке 1.

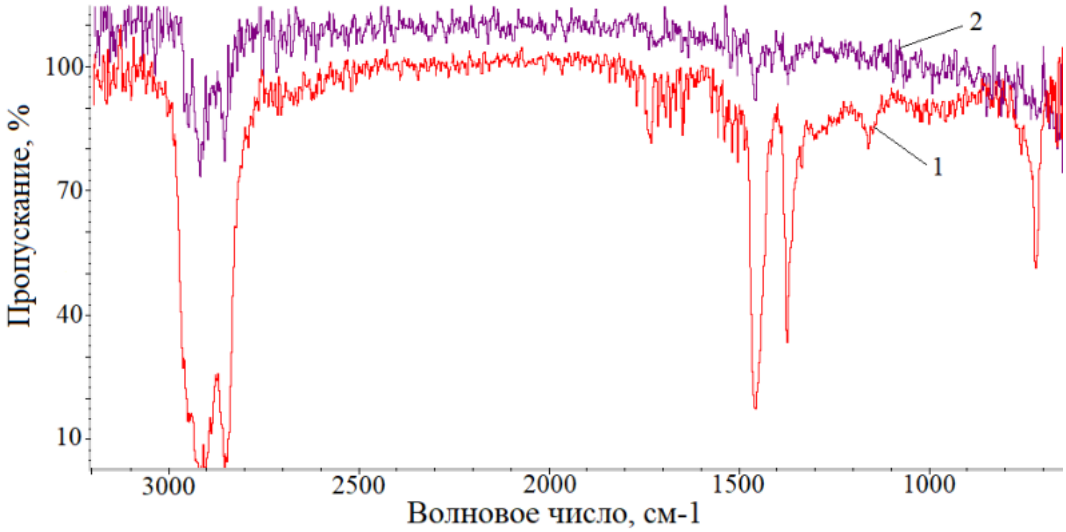


Рис. 3. ИК спектры поверхностей трения, сформированных в вазелиновом масле, содержащем 3% Х-18 и 3% Х-26: *1* – после промакивания фильтровальной бумагой, *2* – после обработки бензином

Выводы

Строение и свойства граничных пленок, формируемых при трении в среде вазелинового масла, модифицированного соединениями холестерина, зависит от химической природы жидкокристаллических присадок.

Добавление в минеральное масло сложных эфиров холестерина повышает антифрикционные свойства, а хлор-замещенного холестерина – максимальную нагрузочную способность смазочного материала.

При совместном применении холестерилхлорида и холестерилового эфира стеариновой кислоты в вазелиновом масле формируется многослойная граничная пленка, прилежащий к металлу слой которой состоит из химически связанных с поверхностью углеводородных фрагментов, поверх которого располагается планарно ориентированный слой сложноэфирной жидкокристаллической присадки.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-58-00004 и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т20Р-019).

Библиографический список

1. **Марченко, Д.Ю.** Борная кислота и бура как противозадирные присадки к смазочному материалу на основе глицерина / Д.Ю. Марченко, М.В. Бойко, С.Б. Булгаревич // Трение и износ. – 2014. – Т. 35. – № 3. – С. 304-309.

2. **Zhang, J.** Boundary lubrication by adsorption film / J. Zhang, Y. Meng // Friction. – 2015. – Vol. 3. – P. 115–147. DOI 10.1007/s40544-015-0084-4

3. **Guegan, J.** Friction Modifier Additives, Synergies and Antagonisms / J. Guegan, M. Southby, H. Spikes // Tribology Letters. – 2019. – Vol. 67. – P. 83. https://doi.org/10.1007/s11249-019-1198-z

4. **Hsu, S.M.** Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism / S.M. Hsu, R.S. Gates // Tribology International. – 2005. – Vol. 38. – P. 305–312. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.021.

5. Transformation mechanism between the frictional interface under dioctyl sebacate lubrication / H. Yu [et al.] // Tribology International. – 2021. – Vol. 155. – P. 106745. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106745.

6. Effect of materials on tribochemical reactions between hydrocarbons and surfaces / S.M. Hsu, R.S. Gates [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2006. – Vol. 39. – P. 3128–3137. https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/15/S02.

7. Molecular behaviors in Thin Film Lubrication. Part One: Film Formation for Different Polarities of Molecules / S. Zhang [et al.] // Friction. – 2019. – Vol. 7. – № 4. – P. 372—387. https://doi.org/10.1007/s40544-019-0287-1.

8. Повышение антифрикционной способности несущих поверхностей трибосистем при использовании смазочных материалов, легированных соединениями холестерина и комплексонами / М.В. Бойко [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – Т. 22. – № 7. – С. 303-305.

9. Liquid Crystals in Biotribology. Synovial Joint Treatment / S. Ermakov [et al.] // Springer Cham, Heidelberg – New York–Dordrecht–London. – 2016. 211 p.

10. Повышение эксплуатационных свойств минеральных масел комплексообразующими присадками / М.В. Бойко [и др.] // Вестник РГУПС. – 2020. – № 2. – С. 8–14.

УДК 621.892: 547.922 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_181

М.В. Бойко, канд. техн. наук, **И.В. Колесников,** проф. РАН, д-р техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения), **С.Ф. Ермаков,** д-р техн. наук (Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины), **А.А. Бичеров** (Ростовский государственный университет путей сообщения, Южный федеральный университет), **Т.Г. Бойко** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЧНЫХ СМАЗЫВАЮЩИХ СЛОЕВ В СИНТЕТИЧЕСКОМ МАСЛЕ В ПРИСУТСТВИИ ЭТАНОЛАМИНОВ И ЭФИРОВ ХОЛЕСТЕРИНА

Аннотация. *В работе изучено влияние этаноламинов и жидкокристаллических соединений холестерина на свойства граничных слоев, формируемых при трении в синтетическом масле диоктилсебацинате (ДОС). Показано, что механизм действия этаноламинов связан с растворением оксидной пленки на поверхности стали. Взаимодействие базового масла с неокисленным железом приводит к образованию «полимеров трения», что существенно повышает триботехнические свойства смазочного материала. Эфиры холестерина, содержащие в своих молекулах длинный углеводородный радикал, образуют на поверхностях трения планарно ориентированные слои и повышают антифрикционные свойства смазочного материала. Совместное применение различных типов присадок позволяет формировать многослойные граничные слои, одновременно повышающие антифрикционные свойства и максимальную нагрузочную способность смазочного материала.*

The effect of ethanolamines and liquid crystal cholesterol compounds on the properties of boundary layers formed by friction in synthetic oil dioctyl sebacinate (DOS) has been studied. It is shown that the mechanism of action of ethanolamines is associated with the dissolution of the oxide film on the surface of steel. The interaction of the base oil with non-oxidized iron leads to the formation of "friction polymers", which significantly increases the tribotechnical properties of the lubricant. Cholesterol esters containing a long hydrocarbon

radical in their molecules form planar oriented layers on the friction surfaces and increase the antifriction properties of the lubricant. The combined use of various types of additives allows the formation of multilayer boundary layers, simultaneously increasing the antifriction properties and maximum load capacity of the lubricant.

Ключевые слова: граничная смазка, коэффициент трения, синтетическое масло, диоктилсебацинат, этноламины, эфиры холестерина.
Keywords: boundary lubricant, coefficient of friction, synthetic oil, dioctyl sebacinate, ethanolamines, cholesterol esters.

Несмотря на то, что исследованию режима граничной смазки посвящено большое число современных работ [1, 2], многие аспекты этого процесса остаются плохо изученными. Свойства граничных смазывающих пленок крайне разнообразны и зависят как от используемого смазочного материала, так и от условий трения. Удерживание граничных слоев на поверхности возможно, как за счет адсорбционных сил [1-3], так и за счет химических взаимодействий с металлом [4, 5]. Термодинамические расчеты и экспериментальные данные показывают, что наибольшее влияние на трибологические свойства оказывают пленки, сформированные за счет механоактивированных химических реакций [6]. Наиболее сильное снижение трения и износа металлических тел происходит, если на поверхностях трибосопряжений образуются углеродистые отложения, называемые «полимерами трения» [1, 3, 5]. Этим обусловлена практическая значимость и актуальность изучения процессов, приводящих к формированию химически связанных с поверхностью граничных смазывающих слоев.

Было установлено [7, 8], что введение в пластичные смазочные материалы на основе вакуумных дистиллятов присадок этаноламинов улучшает их триботехнические свойства. Модифицирование же этаноламинами очищенных нефтяных масел практически не оказывало влияния на их противоизносные свойства. Совместное добавление этаноламинов и холестерических жидких кристаллов повышало противоизносные свойства пластичных смазок, практически не изменяя при этом их реологических свойств. Обнаруженный эффект объясняется взаимодействием нефтяных кислот вакуумных дистиллятов с этаноламинами, в результате чего образуются органические соединения, обладающие сильными поверхностно-активными свойствами, обеспечивающими при трении формирование граничных смазочных слоев с высокими экранирующими свойствами [7, 8].

Целью работы является исследование граничных смазывающих слоев, формирующихся при трении в синтетическом масле, модифицированном этаноламинами и жидкокристаллическими эфирами холестерина.

Материалы и методы

Испытания смазочных материалов проводили на машине трения торцевого типа по схеме «три пальца по диску». Пальцы и диски были изготовлены из стали марки 40х13, Ra = 0,6÷0,8. Диаметр каждого пальца составлял 10 мм, расстояние от центра диска до середины дорожки трения было 35 мм. Нагрузка повышалась ступенчато на 0,5 МПа каждые 30 мин, скорость скольжения составляла 0,5 м/с. Измеряли изменение коэффициентов трения.

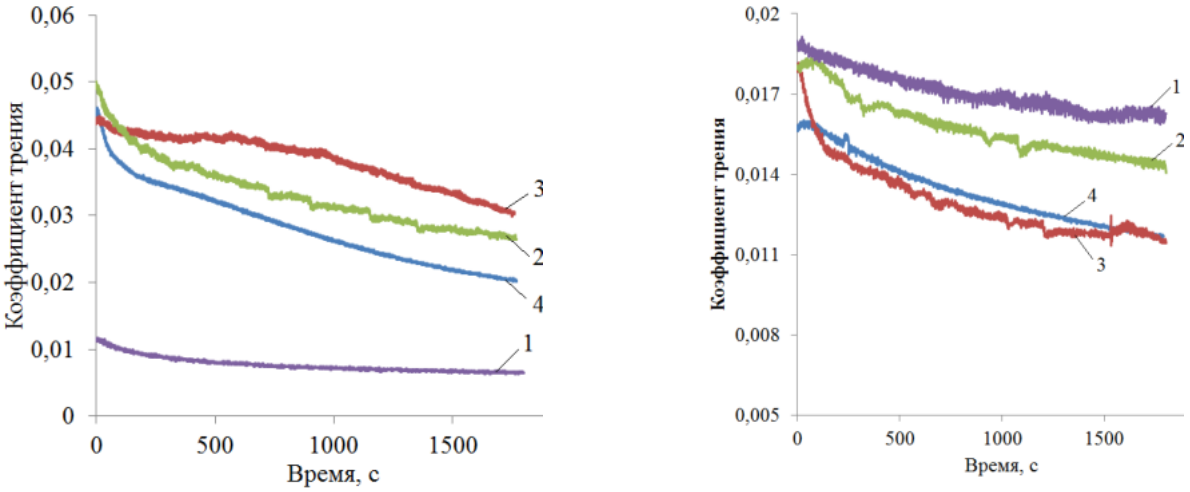
Химические связи фрагментов органических молекул с металлической поверхностью при трении исследовали методом ИК-Фурье спектроскопии с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) на приборе Nicolet 380.

В качестве базового масла использовали синтетическое масло диоктилсебацинат (ДОС), присадки – моноэтаноламин, диэтаноламин, триэтаноламин, холестериловый эфир капроновой кислоты (Х-5) и холестериловый эфир стеариновой кислоты (Х-18).

Результаты и их обсуждение

Добавление в ДОС присадок этаноламинов оказывает существенное влияние на трибологические свойства смазочного материала. Изменение антифрикционных свойств модифицированных масел зависит от нагрузки на узел трения, рисунок 1. При низких

нагрузках до 2,5 МПа чистый ДОС обеспечивает очень низкие коэффициенты трения, рисунок 1 (а). Наблюдаемый эффект можно объяснить исходя из состава формируемых в присутствии присадок граничных слоев. Молекулы этаноламинов содержат в своем составе группы, способные реагировать с железом. За счет химического взаимодействия присадок со сталью, граничные слои состоят преимущественно из адсорбированных на поверхности комплексных соединений железа и этаноламинов. Так как размер молекул присадок меньше, чем у ДОС, то и граничные слои, сформированные в присутствии этаноламинов, имеют меньшую толщину и обладают худшими антифрикционными свойствами, чем базовое масло. При нагрузках 3,0 МПа и выше, рисунок 1 (б), присадки обеспечивают более низкие коэффициенты трения. Повышение нагрузки приводит к удалению с поверхности трения комплексных соединений железа, в результате чего граничные пленки формируются преимущественно из молекул базового масла. Более высокие антифрикционные свойства модифицированных масел могут быть объяснены сглаживанием микрорельефа поверхности, а также удалением оксидного слоя, в результате чего формирование граничных пленок происходит на поверхности неокисленного металла.



а) б)

Рис. 1. Трибограммы смазочных материалов: *1* – ДОС, *2* – ДОС + 0,5 % моноэтаноламина, *3* – ДОС + 0,5 % диэтаноламина, *4* – ДОС + 0,5 % триэтаноламина при нагрузке *а)* 1,5 МПа и *б)* 3,0 Мпа

Добавление в ДОС этаноламинов приводит также к повышению максимальной нагрузочной способности смазочного материала, таблица. Полученные результаты объясняются образованием более прочных граничных смазывающих слоев в присутствии присадок этаноламинов.

Таблица 1

Изменение максимальной нагрузочной способности ДОС при добавлении этаноламинов

	ДОС	ДОС+0,5% моноэтаноламина	ДОС+0,5% диэтаноламина	ДОС+0,5% триэтаноламина
Максимальная нагрузочная способность, МПа	4	8	12	7

По окончании испытаний на дорожках трения наблюдали формирование «полимеров трения», имеющих окантовку черного цвета, рисунок 2. Граничные пленки, сформированные в присутствии этаноламинов, очень прочно связаны с поверхностью металла. Они могут быть удалены с поверхности только растворителем при механических воздействиях. Напротив,

вещество, составляющее черную окантовку дорожки трения, плохо связано с металлом и легко удаляется при протирании фильтровальной бумагой.

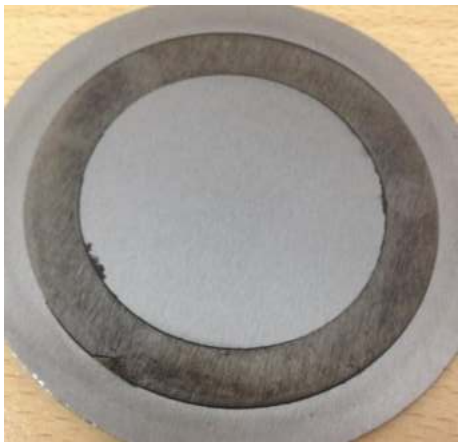


Рис. 2. Фотография диска после испытаний в среде ДОС+0,5% триэтаноламина

Исследование связей фрагментов органических молекул с поверхностью металла при образовании граничных пленок изучали методом ИК-спектроскопии НПВО, рисунок 3. Спектр 1 на рисунке 3 соответствует поверхности, сформированной в смазочном материале ДОС+0,5%триэтаноламина. Он содержит полосы поглощения групп –ОН (3600-3000 $см^{-1}$) валентных колебаний связей С-Н (2960, 2929, 2858 $см^{-1}$); валентных колебаний связей С=О (1735 $см^{-1}$); деформационных колебаний групп CH_2 и CH_3 (1463, 1247 $см^{-1}$); валентных колебаний связей С-О сложных эфиров (1171, 1125 $см^{-1}$); валентных колебаний связей С-N (1150-1100 $см^{-1}$), деформационных колебаний групп CH_3 (1031 $см^{-1}$); деформационных колебаний групп CH_2 (780, 725 $см^{-1}$). После удаления вещества, составляющего черную окантовку дорожки трения, спектр поверхности трения значительно изменяется, спектр 2 на рисунке 3. Этот спектр полностью совпадает со спектром граничной пленки, сформированной в чистом ДОС. Характерные для этаноламинов полосы поглощения групп –ОН при 3600-3000 $см^{-1}$, связей С-N при 1150-1100 $см^{-1}$ полностью отсутствуют. Это значит, что этаноламины образуют с железом комплексы, которые удаляются с поверхности трения, то есть функция таких присадок заключается в растворении оксидной пленки. Результаты трибологический испытаний показывают, что сформированная на неокисленном железе граничная пленка обладает лучшими антифрикционными свойствами и максимальной нагрузочной способностью.

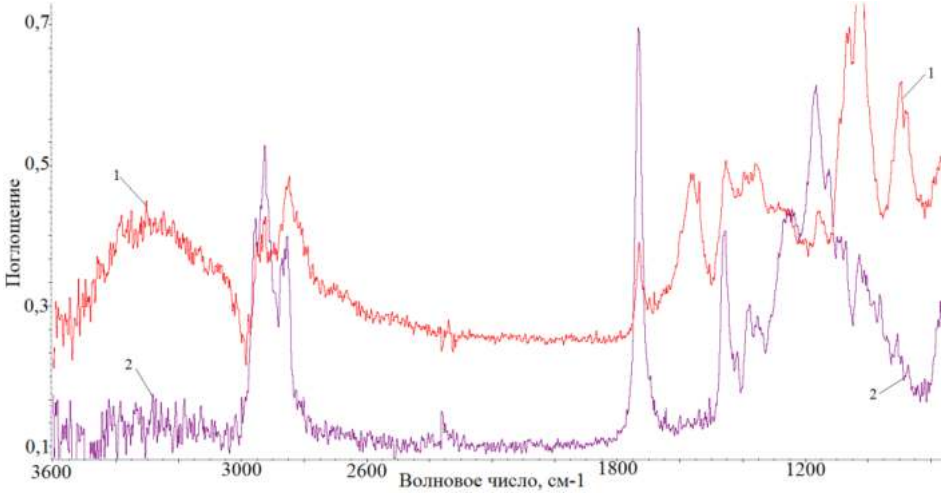


Рис. 3. ИК-спектры граничных пленок: *1* – ДОС + 0,5% триэтаноламина, *2* – ДОС + 0,5% триэтаноламина после удаления вещества, составляющего черную окантовку дорожки трения

Для снижения высоких коэффициентов трения, наблюдаемых при добавлении в ДОС этаноламинов при нагрузках до 2,5 МПа, в смазочный материал ДОС + 0,5% триэтаноламина добавляли жидкокристаллические присадки Х-5 и Х-18, рисунок 4.

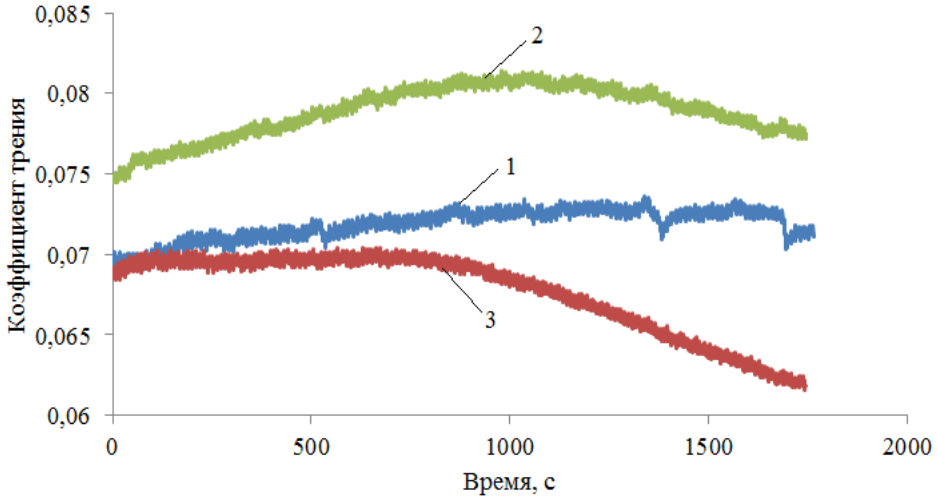


Рис. 4. Трибограммы смазочных материалов: *1* – ДОС + 0,5% триэтаноламина, *2* – ДОС + 0,5% триэтаноламина + 3% Х-5, *3* – ДОС + 0,5% триэтаноламина + 3% Х-18

Понижение коэффициентов трения, вызванное образованием планарно ориентированных слоев, наблюдали только при использовании присадки Х-18, рисунок 4. Длинный углеводородный радикал жирнокислотного фрагмента холестерилового эфира Х-18 обеспечивает лучшую растворимость присадки в базовом масле, а также позволяет формировать граничные слои большей толщины.

Выводы

1. Добавление в синтетическое масло ДОС этаноламинов позволяет существенно увеличить антифрикционные свойства и максимальную нагрузочную способность смазочного материала.

2. Механизм действия этаноламинов связан с растворением оксидной пленки на поверхности железа, в результате чего граничная пленка формируется на неокисленном металле.

3. Добавление в смазочный материал жидкокристаллических эфиров холестерина способствует повышению антифрикционных свойств только при наличии в структуре их молекул достаточно длинного углеводородного радикала.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-58-00004 и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т20Р-019).

Библиографический список

1. **Hsu, S.M.** Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism / S.M. Hsu, R.S. Gates // Tribology International. – 2005. – Vol. 38. – P. 305–312. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.021.

2. **Zhang, J.** Boundary lubrication by adsorption film / J. Zhang, Y. Meng // Friction. – 2015. – Vol. 3. – P. 115–147. DOI 10.1007/s40544-015-0084-4

3. **Guegan, J.** Friction Modifier Additives, Synergies and Antagonisms / J. Guegan, M. Southby, H. Spikes // Tribology Letters. – 2019. – Vol. 67. – P. 83. https://doi.org/10.1007/s11249-019-1198-z

4. Формирование поверхностных структур при трении в синтетических маслах / А.В. Сидашов, М.В. Бойко, А.Т. Козаков, В.В. Лесняк // Трение и износ. – 2020. – Т. 41. – № 5. – С. 567-571.

5. Повышение эксплуатационных свойств минеральных масел комплексообразующими присадками / М.В. Бойко, И.В. Колесников, С.Ф. Ермаков, Т.Г. Бойко, А.А. Бичеров // Вестник РГУПС. – 2020. – № 2. – С. 8–14.

6. Термодинамический и кинетический анализы вероятных химических реакций в зоне трибоконтакта и влияние высокого давления на протекание адсорбционных процессов / С.Б. Булгаревич, М. В. Бойко, В. И. Колесников, В.А. Фейзова // Трение и износ. – 2011. – Т. 32. – № 4. С. 233-243

7. Повышение антифрикционной способности несущих поверхностей трибосистем при использовании смазочных материалов, легированных соединениями холестерина и комплексонами / М.В. Бойко, И.В. Колесников, С.Ф. Ермаков, Т.Г. Бойко, А.А. Бичеров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – Т. 22. – № 7. – С. 303-305.

8. Триботехнические характеристики химически неактивных поверхностей в смазочных материалах, легированных соединениями холестерина и жирных кислот / С.Ф. Ермаков, А.П. Сычев, И.В. Колесников, М.В. Бойко, А.А. Сычев, С.И. Соколов, А.Ю. Кравченко // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 1. – С. 13-23.

УДК 620.179.112 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_186

М.А. Буракова, канд. техн. наук, **В.В. Шаповалов,** д-р техн. наук, **Т.Л. Саямова, В.Б. Мищиненко** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНО-РОТОПРИНТНОЙ ЛУБРИКАЦИИ ФРИКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ГРЕБЕНЬ КОЛЕСА ЛОКОМОТИВА-РЕЛЬС»

Аннотация. *Рассмотрены преимущества твердых смазочных материалов, влияние на их триботехнические характеристики функциональных присадок, таких как графит чешуйчатый, литейный; наноприсадки в виде расслоенного и терморасширенного графита, смеси мелкодисперсных порошков алюминия и его сплавов. Описаны способы повышения износостойкости пары трения «колесо-рельс» путем лубрикации. Приведены последние тенденции в развитии систем подачи смазочных материалов в открытые узлы трения, проблемы, связанные с оснащением подвижного состава такими системами. Исследованы причины появления нестабильности усилия прижатия смазочного стержня к гребню колеса и влияния ее на ресурс разовой заправки лубрикационного технологического оборудования. Представлены теоретические основы фрикционного сервоэффекта.*

The advantages of solid lubricants, the effect on their tribotechnical characteristics of functional additives such as graphite flake, foundry; nanoprids in the form of layered and thermally expanded graphite, mixtures of fine powders of aluminum and its alloys are considered. The methods of increasing the wear resistance of the wheel-rail friction pair by lubrication are described. The latest trends in the development of systems for supplying lubricants to open friction units, problems associated with equipping rolling stock with such systems are presented. The reasons for the appearance of instability of the force of pressing the lubricating rod to the wheel crest and its effect on the resource of one-time refueling of lubricating technological equipment are investigated. The theoretical foundations of the friction servo effect are presented.

Ключевые слова: износ гребней колес, твердый смазочный материал, функциональные присадки, возникновение сервоэффекта, геометрическая оптимизация лубрикационных систем.
Keywords: wear of wheel ridges, solid lubricant, functional additives, the appearance of a servo effect, geometric optimization of lubrication systems.

В настоящее время для повышения стойкости к изнашиванию колес подвижного состава применяют несколько способов повышения твердости бандажа, такие как закалка и отпуск, использование легированных сталей, воздействие плазмой. Износостойкость после закалки и отпуска для конструкционных и легированных сталей возрастает линейно. При повышении твердости стали до значений более 400 НВ появляется тетрагональная α-фаза, которая является причиной снижения демпфирующей способности, что приводит к образованию трещин и сколов. Помимо конструкционных методов повышения износостойкости существуют и иные [1…3], такие как контроль характера нагружения, защита от воздействия окружающей среды, соблюдение техпроцессов производства и технический контроль.

Проблема аномально-интенсивного изнашивания гребней колес подвижного состава в настоящее время является острой, и особенно актуальна ввиду общего износа фонда вагонов и локомотивов [1, 4…7]. Срок службы колеса, согласно нормативной документации ОАО «РЖД» составляет около 10 лет. Однако, на практике этот срок в несколько раз меньше. На поворотах гребень колеса может испытывать давление со стороны рельса, превышающее предел текучести стали, что неизбежно приводит деформации гребня с последующим снижением износостойкости. В качестве решения данной задачи можно рассматривать технологию контактно-ротапринтного гребнерельсосмазывания (ГРС). Сочетая комплексный, научно-обоснованный подход к обеспечению выходных триботехнических параметров системы «колесо-рельс», простоту и надежность технологического оборудования процесса лубрикации, система ГРС обеспечивает высокую эффективность смазывания [2…4].

Система ГРС способствует уменьшению не только естественного износа, вызванного трением гребня о боковую поверхность головки рельса в процессе движения, но и технологического износа, то есть износа, вызванного обточкой колеса. Такой вид износа может составлять до 80% от величины общего износа, что существенно влияет на ресурс колес подвижного состава. Уменьшение толщины обода колеса в среднем составляет у 40% колесных пар на 7-8 мм и у 60% на 10-11 мм.

Являясь сложным процессом, износ колесных пар и рельсов зависит от многих факторов [1, 5, 6], взаимосвязи которых могут быть установлены только на основе систематических наблюдений за парой трения. Так адгезивный износ по причине термического и атермического схватываний контактирующих поверхностей трения гребней колес, появляющийся по причине воздействия микронеровностей и образования между ними алгезивных микросоединений, связан с отделением и смещением частиц металла, окислением и пластической деформацией.

В отличии от аналогов, таких как форсуночные системы подачи жидких и консистентных смазочных материалов, благодаря которым не могут быть сформированы условия формирования масляного клина, как например в закрытых узлах терния, ввиду влияния ветровой нагрузки, а в следствии этого снижается эффективность, система ГРС обеспечивает независимый от условий окружающей среды процесс лубрикации.

Замасливание подвижного состава вагонами рельсосмазывателями является существенной проблемой применения технологии лубрикации жидкими смазочными материалами. Также опыт использования таких систем показывает, что при затяжном подъеме машинисты локомотивов предпочитают отключать бортовые системы подачи жидкого смазочного материала. Это связано с выдавливанием смазочного материала из зоны контакта гребня и боковой поверхности головки колеса на рабочую поверхность круга катания. Выдавливание смазочного материала может также привести к юзу, что в свою очередь влечет

за собой неравномерный износ колеса по окружности, а также появление двухсторонних ползунов [4].

В качестве аналога вагона-рельсосмазывателя может быть рассмотрен стационарный путевой лубрикатор. Преимущества такого типа систем рельсосмазывания состоит в том, что при осуществлении лубрикации не происходит прямой контакт рабочих органов системы и элементов подвижного состава, что исключает негативное влияние динамики подвижного состава. Также бесконтактно осуществляется обнаружение колес. Еще одним плюсом является работа системы без необходимости вмешательства обслуживающего персонала. Стационарные путевые рельсосмазыватели являются форсуночными системами, использующими пластичные и жидкие смазочные материалы, что является ограничивающим фактором их использования. Основным недостатком является разбрызгивание смазочного материала, связанное с явлением центробежного сброса. Замасливание балластной призмы ведет к ухудшению ее дренажных свойств, снижению демпфирующих свойств и, как следствие этого, к просадке шпал.

С целью обеспечения безызносного режима работы пары трения необходимо наличие тонкой непрерывной смазочной пленки, разделяющей поверхности трения. Известно, что при высоких температурах элементов пары трения и увеличении нагрузок обеспечение непрерывности образования пленки смазочного материала затрудняется ввиду снижения вязкости, а при увеличении температуры поверхностей пары трения возможна десорбция смазочного материала. Это касается жидких и пластичных смазочных материалов.

Твердые смазочные материалы, (ТСМ) эффективны при реализации режимы граничной смазки [1…4]. Такой режим возникает при воздействии высоких нагрузок, при повышенных температурах или при малых относительных скоростях движения элементов трибосистемы. Формируемый слой ТСМ (до 0,1 мм) обладает высокой несущей способностью и легкостью сдвига. Триботехнические параметры обеспечивают наличие третьего тела в виде смазочного материала (СМ) между контактирующими поверхностями трения и защиту их от износа. Эти параметры предотвращают прямой контакт трущихся поверхностей. Стоит отметить, что ТСМ способен увеличивать фактическую площадь касания, заполняя собой микрошероховатости, что в свою очередь приводит к более равномерному распределению нагрузки в зоне контакта гребня колеса с рельсом.

При механическом повреждении смазочной пленки из ТСМ возможно ее самовосстановление в следствии работы узла трения и миграции объемов смазочного материала в зону контакта ювенильных поверхностей материалов колеса и рельса, что предотвращает атермическое и термическое схватывания и снижает потери на трение.

Наиболее эффективными и распространенными видами твердых антифрикционных присадок являются графит, дисульфид молибдена, высокодисперсный углерод, фторид церия и политетрафторэтилен. Использование этих присадок в комплексе с наночастицами мягких металлов, таких как алюминий и его мягкие сплавы дает синергирующий эффект, приводя к снижению коэффициента трения до 35%.

Главным элементом и основой технологии ГРС является смазочный стержень (СС) РАПС (рис.1), реализующий аккумулятивный контактно-ротапринтный способ смазки открытых пар трения.

Подвижной состав, преодолевающий за смену не более 150-200 км (маневровые локомотивы, промышленный транспорт) рекомендуется оснащать системами ГРС приводного типа на основе пружины.

Гребнесмазывателями же кассетного (бесприводного типа) следует устанавливать на подвижной состав, эксплуатируемый на «длинных» плечах (более 1000 км) (рис.2).

В настоящее время разрабатывается проект рельсосмазывающего комплекса путем оснащения системой ГРС единицы специализированного самоходного подвижного состава, в частности машин МПТ-Г. Для обеспечивания смазки рельсов на прямых участках пути, ввиду отсутствия непогашенного ускорения, возможно оснащение мотовоза устройством поворота тележки, что гарантирует нанесение смазочного материала на обе рельсовые нитки. В качестве

устройства поворота может быть использован гидроцилиндр, установленный на раму путевой машины и соединенный с рамой тележки с помощью гибкой связи, для исключения негативного влияния динамических нагрузок, возникающих при движении.

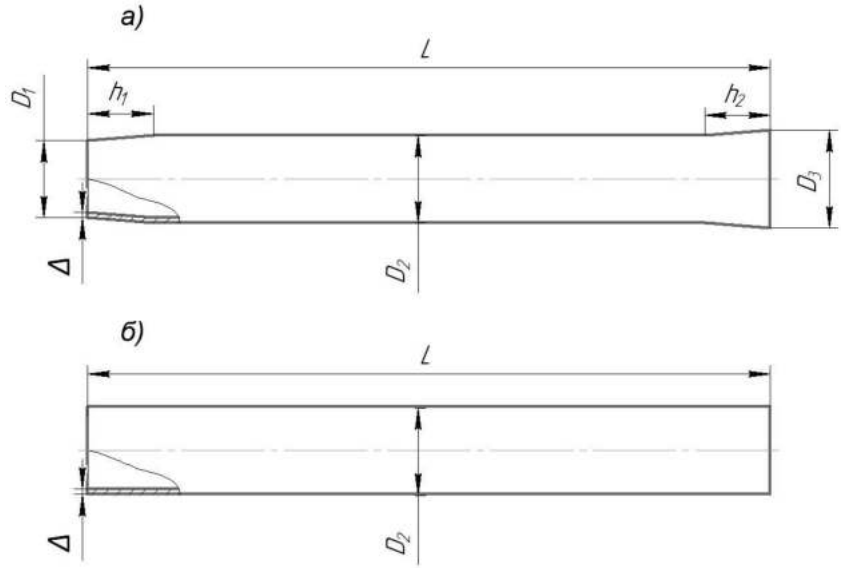


Рис. 1. Конфигурации стержней
а) конусообразный стержень; *б)* цилиндрический стержень

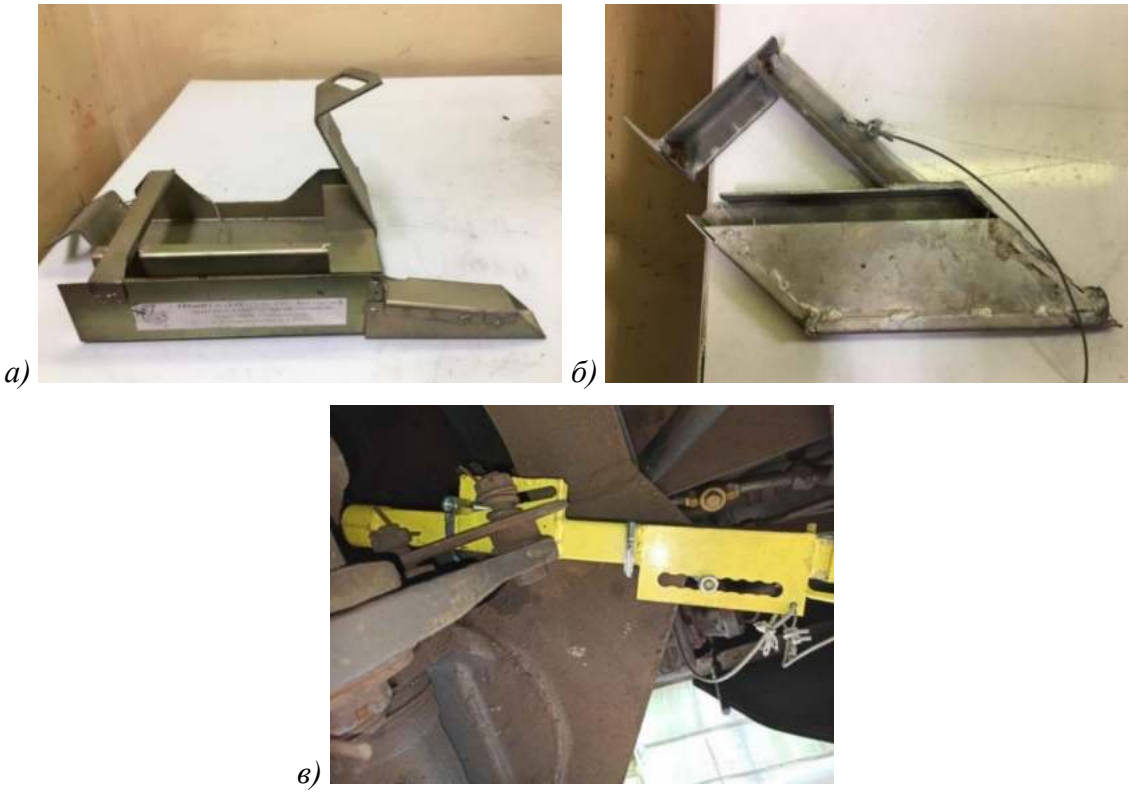


Рис. 2 Типы бортовых конструкций
а), б) гребнерельсосмазыватели кассетного типа; *в)* гребнерельсосмазыватель приводного типа, установленный на локомотив 2М62У

Для надежной работы системы гребнесмазывания в тяжелых погодных условиях необходимо обеспечить надежную герметизацию бункера ГРС и выходного канала Капли воды и снег могут образовывать наледь, препятствующую нормальному процессу смазки, а также создают вероятность разрушения технологического оборудования.

Конструкции ГРС должны обеспечивать смазку путем фрикционного натирания тонкого слоя смазочного материала. При этом толщина слоя должна быть не менее 0,05 мм. Для осуществления целей повышения ресурса гребней колес путем смазки необходимо рассмотреть поведение СС в устройстве подачи и силы, воздействующие на него.

При движении подвижного состава за счет взаимодействия СС и гребня колеса под действием силы прижатия (за счет собственного веса в ГРС кассетного типа и за счет пружины в ГРС пружинного типа) происходит нанесение СМ в следствии постепенного истирания стержня.

Устройство гребнерельсосмазывания жестко крепится к раме тележки. В следствии этого динамика относительного движения, а также возникающее увеличение температуры частей тележки будет влиять на процесс смазки [4…6]. Так силы трения, препятствующие свободному перемещению стержня в состоянии покоя системы, могут оказывать малое воздействие либо вообще не оказывать его при малых углах между СС и гребнем колеса.

При оснащении системой ГРС конкретного локомотива может возникать ряд проблем, в том числе недостаток свободных геометрических объемов для навешивания дополнительного оборудования. Так при оснащении локомотива 2М62У отсутствует возможность направить СС перпендикулярно плоскости касательной плоскости гребня колеса, прямая AB_2 (рис.3). При вынужденном отклонении от этой линии вновь получаемый угол уже не будет максимальным, то есть траектория стержня не будет являться линией ската, прямая AB_1 или AB_3.

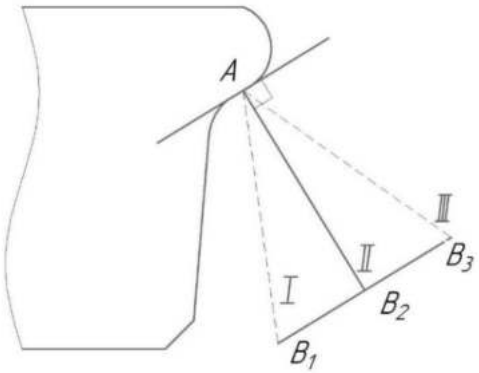


Рис 3. Предполагаемые углы между касательной плоскостью к поверхности конуса гребня колеса в точке касания и осью смазочного стержня

Условие реализации процесса лубрикации поверхностей трения определяется управляемым параметром – давлением твердого смазочного материала на смазываемую поверхность. В настоящее время в серийно выпускаемых гребнерельсосмазывателях ГРС 40.01 используется консервативный привод с цилиндрической пружиной сжатия, у которой давление в данном приводе меняется от 20,8 Н до 2,6 Н. Данное положение не только резко снижает эффективность работы привода, но и создает условия в зоне миграции СМ на тяговою поверхность колеса в случае применения несертифицированных пластичных или жидких смазочных материалов.

Определить угол ската (рис.4) можно по формуле:

$$\alpha = arctg\frac{AB_i}{AC_i}$$

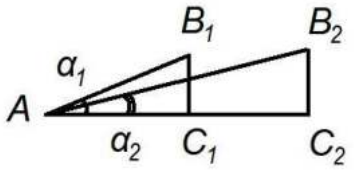


Рис. 4. Определение α угла ската

С целью повышения эффективности технологии ГРС-РАПС были проведены работы по оптимизации параметров консервативного привода ГРС. В частности, был разработан консервативный привод в виде витой цилиндрической пружины из стальной ленты переменной жесткости. В контакте трибосистемы рельс-колесо многослойные пленки непрерывно разрушаются и восстанавливаются, т. е. создаются условия для реализации нормального процесса износа контактирующих элементов трибосистемы.

Таким образом, в результате модельной оптимизации технологического оборудования для лубрикации рабочей поверхности гребня колеса создан компактный, надёжный и эффективный консервативный привод, жёсткость которого прямо пропорциональна изменению плеча приложения усилия на СС, что позволило обеспечить постоянство оптимального усилия прижатия брикета к поверхности гребня колеса.

Эмпирическим путем определено, что величина силы прижатия немного больше произведения силы тяжести на косинус угла между смазочным стержнем и гребнем колеса. Это связано с сервоэффектом, т. е. «подтягиванием» смазочного стержня в сторону относительного движения и усилением силы прижатия. Для реализации данного эффекта необходимо определить оптимальный угол наклона смазочного стержня.

Для обеспечения адекватности физико-математической модели (ФММ) мобильной технической системы и натурной мобильной технической системы физико-математическое моделирование выполняется в *m* – масштабах линейных размеров с последующим определением относительных, абсолютных погрешностей; коэффициентов конкордации и корреляции фиксируемых выходных параметров в *m* физико-математических моделях.

Разработаны теоретические основы сервоэффекта, разработана конструкция бесприводного кассетного типа с постоянным усилием прижатия, определен оптимальный угол между касательной плоскостью к поверхности конуса гребня колеса в точке касания и осью смазочного стержня.

Библиографический список

1. Technologies for Improving the Wear Resistance of Heavily Loaded Tribosystems and Their Monitoring / V.I. Kolesnikov [et al.] // (2020) Journal of Friction and Wear/ Vol. 41, № 2.

2. Diagnostics of dissipative characteristics of friction damper / S.L. Chernyshev [et al.] // (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 996, № 1.

3. Selective suppression of amplitudes of frictional oscillations / V.I. Kolesnikov [et al.] // (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 900. № 1.

4. **Kokhanovsky, V.A.** A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel-Rail System / V.A. Kokhanovsky; D.V. Glazunov // Journal of Friction and Wear (2020). Vol. 41, № 6.

5. **Rushabh, G.** Rail-wheel contact forces and track irregularity estimation from on-board accelerometer data, Vehicle System Dynamics / G. Rushabh, N.S. Vyas // (2021). DOI: 10.1080/00423114.2021.1899253

6. Dynamic Track Irregularities Modeling when Studying Rolling Stock Dynamics: [preprint] / I. Bondarenko [et al.] // Transport Means 2019: Proc. of the 23rd Intern. Sci. Conf. (Oct. 02–04, 2019, Palanga, Lithuania / Kaunas Univ. of Technology [et al.]. – Kaunas, 2019. – Pt. II. – P. 1014–1019. Fragm. text.

7. Surface Modification Features of Tool Steels by Laser Radiation / A.V. Sidashov [et al.]. // (2020) Journal of Friction and Wear Vol. 41, №6.

УДК 621.89 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_192

И. А. Майба, д-р техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЛОКОМОТИВА

Аннотация. *В работе представлены результаты исследований по анализу современных технических средств и технологий повышение ресурса и сокращение стоимости жизненного цикла колёсной пары локомотива. Выполнены расчеты и представлены результаты технико-экономической эффективности применения современных инновационных устройств гребнесмазывания (УСГЛ) и устройств плазменного упрочнения (УППУ) колесных пар локомотивов, а также устройств активации сцепления (УАТЛ).*

The paper presents the results of research on the analysis of modern technical means and technologies to increase the resource and reduce the cost of the life cycle of a locomotive wheelset. Calculations have been performed and the results of the technical and economic efficiency of the use of modern innovative comb lubrication devices (USGL) and plasma hardening devices (UPU) of locomotive wheelsets, as well as clutch activation devices (UATL) are presented.

Ключевые слова: активатор трения, испытания, система активации трения, тяговые характеристики локомотива, этапы проекта, методика, технико-экономическое обоснование.
Keywords: friction activator, tests, friction activation system, locomotive traction characteristics, project stages, methodology, feasibility study.

1. Введение

Стратегия организации ремонта локомотивов в условиях технологии управления тяговыми ресурсами на полигоне должна быть направлена на повышение эффективности эксплуатационной работы локомотивов, которая на текущий момент, остается низкой.

Одним из сдерживающих факторов улучшения показателей использования локомотивов является низкий жизненный цикл колесной пары грузового локомотива. Известно, что ресурсные характеристики бандажа грузового локомотива значительно ниже плановых показателей и установленных межремонтных пробегов. По электровозам средний фактический ресурс бандажей колесных пар за последние три года остается на уровне 500 тыс. км, по тепловозам этот показатель находится на уровне 380 тыс. км. В связи с чем смены бандажей проводятся в межремонтный период, а затем повторно на плановых видах ремонта. Такая разбалансированность приводит к выбраковки бандажей колесных пар не достигших предельного износа, снижению коэффициента технической готовности из-за простоев локомотивов в ТО-4 и к колоссальным непроизводительным потерям.

Причины этого хорошо известны, главная это отсутствие системной работы по использованию ресурсосберегающих технологий как следствие высокий эксплуатационный износ гребней, применение нерациональных технологий обточки, недостаточное упрочнение колесной пары, низкий уровень прогнозирования состояния геометрии колес.

2. Материалы и методы исследований

Объектом настоящих исследований являются ресурсосберегающие технологии, направленные на повышение ресурса и сокращение стоимости жизненного цикла колёсной пары. Одним из факторов, обеспечивающих повышение ресурса колесной пары является формирование оптимальных условий фрикционного контакта в системе «колесо-рельс». Эффективное применение современных технологий управления фрикционным состоянием контакта «колесо-рельс» позволяет снижать стоимость жизненного цикла колесной пары, повышать тягово-сцепные характеристики локомотива, продолжительность безотцепочного пробега локомотивов, управлять интервалом замены бандажа колёсной пары.

В ходе работы использовались аналитические методы исследований, методы систематизации при обработке информации, патентные исследования, а также анализ работ ученых и специалистов в рассматриваемой области.

Цель работы – анализ современных технических средств и технологий повышение ресурса и сокращение стоимости жизненного цикла колёсной пары локомотива, оценка их эффективности применения.

3. Результаты

Рассматриваемые вопросы повышение ресурса и сокращение стоимости жизненного цикла колёсной пары весьма актуальны, особенно для грузовых локомотивов, работающих в сложных эксплуатационных условиях тяжеловесного движения на полигоне и на горных участках. Практика эксплуатации таких локомотивов показывает, что издержки, связанные с низким ресурсом жизненного цикла колесных пар весьма существенны.

К средствам, которые способны существенно повлиять на состояния контактного взаимодействия колеса с рельсом относятся системы лубрикации, упрочнения, активизации сцепления, методы обточки и прогнозирования. В краткосрочной перспективе применение современных технических средств и инновационных технологий ресурсосбережения способно повысить ресурс бандажа до плановых показателей решить данную проблему. Ключевым условием успеха здесь является комплексный консолидированный подход использования всех этих технологий под единым управлением, при строгом контроле результативности мероприятий.

В долгосрочной перспективе необходимо развивать существующие сейчас технологии до уровня, когда они будут обеспечивать условия, когда все элементы колесной пары от подшипника и осей до бандажа будут иметь равный срок службы, что позволит проводить полную смену колесной пары со всеми ее элементами один раз на межремонтном пробеге от 1200 тыс. км и выше.

В ходе исследований были рассмотрены вопросы технико-экономической эффективности применения современных инновационных устройств гребнесмазывания (УСГЛ) и устройств плазменного упрочнения (УППУ) колесных пар локомотивов, а также устройств активации сцепления (УАТЛ). Практика эксплуатации устройств УСГЛ и УППУ показала, что наиболее эффективным является их совместное применение. На первом этапе необходимо провести обточку колесной пары по профилю, который обеспечивает толщину гребня 29..31 мм. Затем проводится плазменная обработка колеса. После чего колесная пара попадает в эксплуатацию, где устройства УСГЛ, установленные на каждом колесе на протяжении всего жизненного цикла, контактно подают на гребень упрочнённого колеса твердый антифрикционный смазочный материал (ТАЭЛ). Такая технология совместного применения дает консолидированный эффект, с увеличением в два, три раза пробега между обточками локомотивных колёсных пар, с повышением ресурса бандажа более чем в 1,5 раза.

Расчёты экономической эффективности от применения УППУ на примере упрочнения гребней колёсных пар грузовых электровозов и магистральных тепловозов с последующим применением устройств УСГЛ и смазочных элементов ТАЭЛ показывают, что совместное применение технологии упрочнения и лубрикации обеспечивает совокупное снижение затрат (рис.1). Дирекции тяги на поддержание жизненного цикла колесной пары 29,1% соответственно для грузовых электровозов и на 30,8% для магистральных тепловозов. Для Сервисных компаний снижение затрат составит 29,0 и 29,4% соответственно для электровозов и тепловозов это без учёта простоя в ремонте, рисков штрафа за невыполнение коэффициента технической готовности, внеплановыми ремонтами, простоя и перепростоя в ремонте и в ожидании ремонта.

Одной из важных аспектов увеличения жизненного цикла колесной пары является внедрение систем активации сцепления локомотивов, которые позволят снизить до минимума или совсем отказаться от применения пескоподачи для повышения сцепных свойств локомотива. Анализ мирового опыта показывает, что применение современных средств активизации сцепления колес локомотивов является перспективным средством повышения сцепных свойств локомотива и снижения износа трущихся поверхностей колеса.

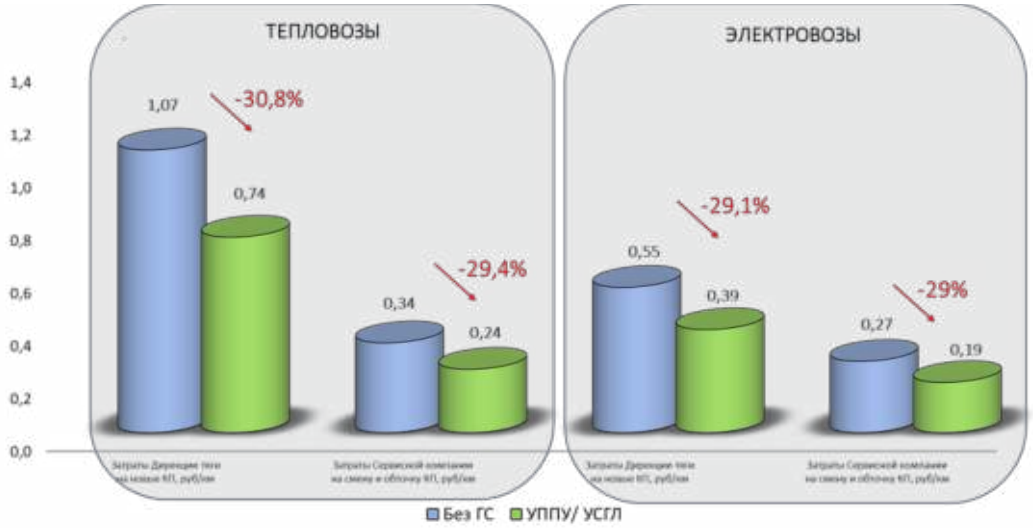


Рис. 1. Снижение затрат на поддержание жизненного цикла колесной пары

Применения систем активации сцепления позволяет снизить износ колесных пар, улучшает тягово-скоростные возможности локомотивов и снижает негативное влияние песка на верхнее строение пути, характеристики балластной призмы, работу рельсовых цепей СЦБ.

Сцепление колес локомотива с рельсом в значительной мере зависит от текущих климатических условий, которые определяют состояние тяговых поверхностей колеса и рельса. В таких нестабильных условиях коэффициент сцепления в зоне контакта может изменяться в широких пределах и быстро во времени [1-4]. Поэтому, обеспечить стабильные значения коэффициента сцепления необходимых для движения без боксования пределах практически невозможно. В связи с чем, специалисты и ученые по всему миру предлагают для предотвращения боксования использовать как традиционные средства в виде пескоподачи, так и разнообразные механические, химические способы активации сцепления посредством очистки рельсов [5-7], методы оценки проскальзывания колесной пары [8], применения абразивных порошков, модификаторов трения.

В рамках выполнения работ по созданию инновационных технических средств в области повышения тягово-сцепных характеристик локомотивов на Новочеркасском локомотивостроительном заводе в 2020 году начали реализовывать проект оснащению новых электровозов серии 3ЭС5К ресурсосберегающими техническими средствами разработанными учеными ФГБОУ ВО РГУПС и специалистами компанией ООО «ТрансИнТех». Это устройствами активации трения зоны поверхности катания колес локомотивов (УАТЛ) и устройствами смазывания гребней локомотива УСГЛ по совместному проекту с ООО ПК НЭВЗ.

Электровоз 3ЭС5К №1147 производства ООО «ПК «НЭВЗ» 2021 года выпуска изготовлен в комплектации с поосным регулированием силы тяги и моторно-осевыми подшипниками качения был оснащен устройствами УАТЛ и УСГЛ. Опытный пробег электровоза 3ЭС5К № 1147 проводился в виде подконтрольной эксплуатации на полигоне Северо-Кавказской железной дороги на участках Батайск-Лихая-Батайск, Батайск-Таганрог-Батайск, Батайск-Россошь-Батайск в период с 09.02.2021 по 04.03.2021 с участием поездами массой о 7000 до 7300 тонн. Испытания устройств УАТЛ, УСГЛ проводились согласно Программе и методике предварительных испытаний и технического решения по реализации проекта установки УАТЛ и УСГЛ на вновь изготовленном электровозе 3ЭС5К с использованием тягово-энергетической лаборатории.

Схема формирования экспериментального поезда на участке Батайск – Таганрог без прицепной нагрузки представлена на рисунке 2.

Испытания проводятся с использованием следующей схемы испытательного поезда: в голове испытательного состава расположен локомотив, оборудованный системой УАТЛ; в сцепе с ним находится динамометрический вагон, оборудованный измерительным комплексом для тягово-энергетических испытаний; в хвосте опытного поезда установлен вспомогательный

электровоз с системой электрического торможения для создания дополнительной нагрузки на головной электровоз. Реализация тяги электровоза производилась одной головной секцией, двумя тележками, четырьмя тяговыми двигателями 3ЭС5К.

Для имитации прицепной нагрузки по команде руководителя испытаний производилось реостатное торможение вспомогательным локомотивом ВЛ80С.

Рис. 2. Схема формирования экспериментального поезда без прицепной нагрузки

Общий вывод по участку испытаний на участке Батайск – Таганрог:

На основании результатов тягово-энергетических испытаний локомотива серии 3ЭС5К № 1147 оборудованного устройствами УАТЛ с экспериментальным поездом на участке Батайск - Таганрог:

- применение устройств УАТЛ в крайне неблагоприятных условиях по сцеплению приводит к выравниванию токов тяговых двигателей, уменьшению срабатываний боксования и повышению тяговых характеристик на 5-15% с реализацией коэффициента сцепления до 0,283 при скорости 37 км/ч;
- совместное применение устройств УАТЛ автоматической системы пескоподачи приводит к выравниванию токов тяговых двигателей, уменьшению срабатываний боксования и повышению тяговых характеристик на 9-30% с реализацией коэффициента сцепления до 0,295 при скорости 45 км/ч;
- применение устройств УАТЛ в благоприятных условиях по сцеплению формирует условия для полного исключения боксования без применения песка за счет формирования на поверхностях катания колес локомотива фрикционного слоя с реализацией коэффициента сцепления до 0,335 при скорости 42 км/ч.

Технико-экономическое обоснование применения устройств активации трения УАТЛ выполненное специалистами ФГБОУ ВО РГУПС, в рамках разработки технических требований к устройствам активации трения показало, экономическую целесообразность разработки и внедрения технологии. Сопоставление показателей с вариантом сценария строительства экипировочных позиций песком без применения системы стабилизации тягового усилия локомотивов показал, что вариант с применением систем системы стабилизации тягового усилия локомотивов имеет технико-экономическую перспективу, так как расчет технико-экономических показателей доказывает экономическую целесообразность разработки и внедрения технологии.

4 Дискуссия

Дискуссионным остается вопрос каковы перспективы решения проблемы повышения ресурса и сокращение стоимости жизненного цикла колёсной пары локомотива в условиях когда применение ресурсосберегающих технологий находится в ведении частных сервисных компаний, обеспечивающих обслуживание локомотивов по договорам сервисного обслуживания. Приоритетом таких компаний является снижение прямых издержек при проведении работ по обслуживанию локомотивов, а применение ресурсосберегающих технологий позволяет получить существенный эффект в краткосрочной перспективе, но априори увеличивает текущие прямые затраты этих компаний.

5 Заключение

Проведенные исследования позволили провести анализ современных технических средств и технологий повышение ресурса и сокращение стоимости жизненного цикла колёсной пары локомотива. Оценка эффективности их применения показала, что наилучшие результаты могут быть получены при комплексном подходе, обеспечивающем консолидированный эффект снижения стоимости жизненного цикла как результат совместного применения технологий рациональной обточки, плазменного упрочнения, кантатного гребнесмазывания.

Применение систем активизации сцепления локомотивов обеспечивает увеличение пробега локомотивов между экипировками в условиях полигонной эксплуатации локомотивного парка и позволяет отказаться от применения систем пескоподачи снижая негативное влияние песка на верхнее строение пути, характеристики балластной призмы.

Библиографический список

1. **Лужнов, Ю.М.** Управление фрикционным взаимодействием колес подвижного состава с рельсами - резерв снижения себестоимости перевозочной работы / Ю.М. Лужнов, А.Т. Романова // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогноз (3), 11-15.

2. Lubricator Casings for Locomotive Wheel Rim. Russian Engineering Research / V.A. Kokhanovskii [et al.] // (36) 5, 364-365. DOI: 10.3103 / S1 068798X16050099.

3. Улучшение сцепления колес железнодорожного экипажа с рельсами подачей в область контакта частиц окалины или магнетита / И.И. Соснов [и др.] // Трение и износ (39) 4,415-420.

4. К оценке мощности локомотива / В.А. Нехаев [и др.] // Известия Транссиба, 3 (39), 14-31.

5. **Bergman, E.** Friction propertied of spattered dichalcogenide Layers / E. Bergman, G. Melet, A. Simon-Vermet // Tribology International, (14) 6,.329-332.

6. **Эндрюс, Х.И.** Механизм сцепления / Х.И. Эндрюс // Железные дороги мира (9), 27-31.

7. **Приходько, Д.** Поезда в Нидерландах оснастят лазерными системами для очистки рельсов от листвы / Д. Приходько // [Электронный ресурс] http://www.3dnews.ru/906356, 2014.

8. **Mouginsteine, L.** Technical and Economical Problems of Locomotive Wheelsets Adhesion with Rail / L. Mouginsteine // Proceedings of IHHA'99 STS-Conference on Wheel/Rail Interface (1), 307-311, 1999.

УДК 669.14.018.291:621.785.533:621.892 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_196

П.И. Маленко, канд. техн. наук, **К.Д. Релмасира,** канд. техн. наук, **А.Ю. Леонов** (Тульский государственный университет)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И РОСТА ТРЕЩИН И ПОР ВО ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУРАХ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЫ ТРЕНИЯ

Аннотация. *При трении структурные и фазовые превращения происходят в тонких слоях поверхностного слоя. Одним из способов описания процессов на нано- и атомном уровнях является использование метода молекулярной динамики, в результате реализации которого возникает возможность изучить данные явления с использованием различных визуализаторов структуры и структурно-фазовых превращений. При трении механизмы зарождения трещин и пор носят термофлуктуационный характер: под действием восходящей диффузии, источником которой являются термические удары, создаются циклические $\sigma_{цикл}$ и диффузионные $\sigma_{диф}$ напряжения. Диффузионные процессы способствуют залечиванию пор и трещин, с их помощью реализуется процесс образования вторичных структур, а также они участвуют в процессе трещино- и порообразования.*

During friction, structural and phase transformations occur in thin layers of the surface layer. One of method to describe processes at the nano- and atomic levels is using the method molecular dynamics, as a result of which it becomes possible to study these phenomena using various visualizers of structure and structural-phase transformations. The mechanisms of Nucleation of cracks and pores, during frictions has a thermal fluctuation nature: ascending diffusion, the source of which is thermal shocks, creates cyclic σ_{cycle} and diffusion σ_{diff}

stresses. Diffusion processes contribute to the healing of pores and cracks, with their help the process of formation of secondary structures is realized, and they also participate in the process of cracking and pore formation.

Ключевые слова: метод молекулярной динамики, трещины и поры, вторичные структуры, восходящая диффузия, сверхупругость.
Key words: molecular dynamics method, cracks and pores, secondary structures, ascending diffusion, superelasticity.

В течение последних тридцати лет в Тульском государственном университете проводятся исследования, связанные с повышением ресурсной долговечности узлов технологических машин специального назначения (ТМСН). Конструктивная прочность данных изделий обеспечивается теплостойкими сталями с легирующими добавками ниобия, циркония и ванадия. Для получения требуемой ресурсной долговечности используется процесс низкотемпературной нитроцементации (никотрирование). Были установлены оптимальные с точки зрения обеспечения заданного ресурса режимы никотрирования, определены механизмы изнашивания никотрированных покрытий и диффузионной зоны. Однако полученные результаты относились к изделиям, в процессе эксплуатации которых фрикционный нагрев не является доминирующим. Вместе с тем для современных ТМСН характерно ужесточение режимов эксплуатации (удельных давлений и скоростей трения), приводящих, в конечном счете, к увеличению роли температурного фактора. В результате фрикционного нагрева в поверхностном слое происходят структурно-фазовые изменения, переменные по температурным зонам. Однако, влияние фрикционного нагрева на процесс эволюции пор и трещин, которое определяет механизмы изнашивания и ресурс узлов ТМСН, оставалось не исследованным. В результате не установлены как особенности фрикционного нагрева, так и специфика механизмов разрушения поверхностной зоны трущихся деталей. Решение данных проблем в рамках науки о трении (термотрибология) и науки о разрушении металлов не учитывает особенностей процесса трения и во многих случаях является недостаточно корректным. Следует отметить, что в значительной степени устранить отмеченные недостатки позволяет исследование с применением компьютерного моделирования – метода молекулярной динамики (ММД), посредством которого определяются параметры процесса эволюции пор и трещин и механизмов разрушения.

Необходимость перехода исследования проблем трибологии, в частности, исследования процессов структурообразования в процессе трения от континуального приближения (сплошная среда) к ММД (атомный уровень) вызвана целым рядом причин. Первая из них связана с тем обстоятельством, что методы континуального приближения в определенной степени оказались исчерпанными. Вторая причина связана с проблемой масштабного фактора.

При трении структурные и фазовые превращения происходят в тонких слоях поверхностного слоя и описываются электрон-фононными взаимодействиями с явлениями диссипации. Одним из способов описания процессов на нано- и атомном уровнях является использование ММД. В результате реализации ММД возникает возможность изучить процессы, протекающие на атомном уровне, с использованием различных визуализаторов структуры и структурно-фазовых превращений.

Известно, что дислокационное упрочнение приводит к трещинообразованию, то есть к усталостному износу. Существует большое количество моделей трещинообразования. Однако, моделирование данного процесса связано с определенными трудностями.

В связи с тем, что сам процесс разработки программного обеспечения требует больших затрат времени, целесообразно использовать разработанное и апробированное программное обеспечение. В работе использовалась программа Д. Рифкина XMD в версии 2.5.38 [1]. Процесс реализации программы XMD носит пошаговый характер, включающий в себя формирование модельного кристаллита из заданного количества атомов (кристаллических

решеток) различного фазового состава, адаптацию программы XMD к используемому программному обеспечению и собственно исследования механизмов структурно-фазовых превращений в модельных кристаллитах под действием пульсирующих температур на суб- и микрошероховатостях в виде термических ударов. Программа рассчитана на $N \leq 10^5$ атомов.

Классификация физических моделей зарождения трещин и пор приведена в работе [2]. При трении механизмы зарождения трещин и пор носят термофлуктуационный характер: под действием восходящей диффузии, источником которой являются термические удары, создаются циклические $\sigma_{цикл}$ и диффузионные $\sigma_{диф}$ напряжения. Диффузионные процессы, во-первых, способствуют залечиванию пор и трещин, во-вторых, с их помощью реализуется процесс образования вторичных структур, в-третьих, они участвуют в процессе трещино- и порообразования. Кинетически данные процессы практически совпадают.

Источником процесса порообразования служат вакансионные кластеры. Под действием напряжения $\sigma_{диф}$ вакансионные кластеры расширяются, образуя поры. При этом процесс порообразования, носящий вакансионный характер, перемещается к поверхности трения снизу-вверх.

Микромеханизмы и кинетика развития пор рассмотрены в работе [3], в которой подчеркивается, что механизм роста носит вязкий характер и конечным этапом их развития служит слияние с магистральной трещиной. Из работ, в которых вопросы развития пор анализировались с помощью ММД, следует отметить работу [4].

Для исследования процесса порообразования был сформирован кристаллит из α-Fe с количеством атомов $N=3\cdot10^4$. При вводе в программу диффузионного воздействия $\sigma_{диф}$ атомы вначале проходят фазу термического возбуждения, а затем реализуется непосредственно диффузионный процесс.

Рассмотрим влияние кооперативного механизма самодиффузии Fe на структуру α-Fe, содержащую дефект в виде вакансии. Для более наглядного представления на рис. 4.1 приведены траектории диффундирующих атомов Fe, спроектированных на плоскость <101>. В процессе диффузии образуется вакансионный кластер, перерастающий затем в вакансионную пору.

Для анализа процесса образования и развития коротких трещин к кристаллиту прикладывалось напряжение $\sigma_{цикл}$, параллельное плоскости трения в зоне дислокационного упрочнения. Программа моделирования считывает следующую информацию: позиции атомов, упругие постоянные решетки, ориентация решетки, энергия поверхности и желаемая интенсивность напряжений (в единицах интенсивности критического напряжения Гриффитса, которое вычисляет программа).

Моделирование проводилось на массивах образцов, состоящих из примерно 25000 атомов с несколькими различными ориентациями. В этих массивах начальная трещина была создана при нормальной нагрузке на разрыв к трещине по направлению оси z, взятой параллельно краю трещины. Были использованы периодические граничные условия, наружные поверхности решетки были свободны. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

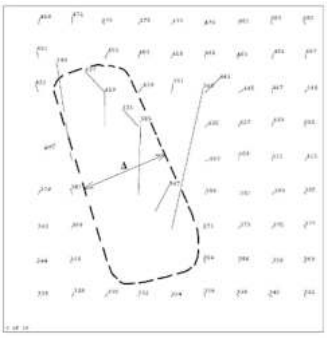


Рис. 1. Изменение структуры исходного кристаллита α-Fe с одной вакансией при кооперативном механизме диффузии (T=900 К, $n=10^4$ шагов) [5].

Трещина длиной a=25 $\dot{A}$ была создана за 2000 шагов при заданном значении σ=5 ГПа. Для предотвращения трещины от захлопывания два наружных слоя атомов на верхней и нижней поверхностях рабочих (по оси z) и свободных поверхностях впереди трещины (по оси x) были застабилизированы. Так как эти неподвижные атомы неспособны поглощать тепловую энергию, они не влияют на внутреннюю температуру, которая будет по существу однородной после релаксации. В зависимости от ориентации плоскостей трещины и нагрузки на разрыв наблюдались различные типы поведения в кристаллографических направлениях. В направлениях [100], [010], [001] имеют место различные дефекты в решетке (рис. 3 а-в).

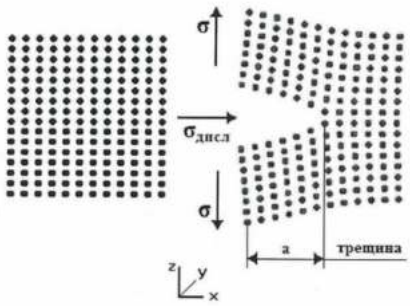


Рис. 2. Изменения в кристаллите,
созданные программой трещинообразования [1]

На рис. 3 а показан вариант притупления трещины, когда массив атомов ориентирован нормально к направлению повторяющихся границ. При этом трещина не распространяется. На рис. 3 б показаны дефекты упаковок в виде переноса связей по всей плоскости разъема. Напряженная область в виде трехлопастной дислокации способна к пластичному разрушению. На рис. 3 в использована процедура фильтрации от перемещений атомов и деформаций, которые локально распределены. Такая симуляция позволяет эффективно визуализировать динамику явлений. “Хвосты” представляют собой смещения атомов (по отношению к исходному положению) за вычетом средних перемещений своих соседей. В этом случае трещина распространяется параллельно поверхности трения, разрушение хрупкое. Теоретические исследования [3] показали, что проявления хрупкого и пластического разрушения имеют место в диапазоне T=600 … 700 K [6].

Основным фактором, влияющим на распространение трещин, служит критическое напряжение, определяемое по формуле

$$K = Q\sigma_f \sqrt{\pi a_f}\ , \qquad (1)$$

где Q – отношение глубины и ширины трещины – корректирующий фактор (Q=1,12);
σ_f и a_f – соответственно напряжение и развитие трещины в направлении перемещения.

На рис. 4 а показан инициированный размер трещины a_f=11,4 $\dot{A}$ (N=5000 шагов), после которого начинается процесс распространения трещины. Следовательно, до момента достижения N=5000 шагов имеет место латентный период в процессе распространения трещины. При этом значение параметра K=0,77 МПа$\sqrt{м}$. При моделировании вокруг области распространения трещины создана транзитная область с 10-20 атомных слоев. При N<6000 шагов вершина трещины перемещается с трудом, совершая при этом колебательное движение. На рис. 4 а можно видеть острие трещины, двойникование, дефекты упаковки и поры. При N>5000 шагов (рис. 4 б) фронт вершины трещины представляет пояс наподобие сферического элемента и небольшие области, содержащие атомы с высокими напряжениями. Это означает, что данные атомы более активированы и способны перемещаться коллективно. В этой связи трещина развивается среди этих небольших областей в высокоактивированные районы. При N>7000 шагов значения напряжений достигают критических значений и распространение трещины идет ускоренно, при этом желобная область, удлиняясь, принимает более определенную форму. При N>9000 шагов трещина пересекает всю конфигурационную

область, напряжение падает и энергия диссипирует в форму длинной свободной поверхности. Приведенные результаты моделирования показывают, что критическим с точки зрения образования и распространения трещин является направление [110], в котором реализуется косой скол. Расчеты показывают, что максимальная скорость распространения трещин $V_{тр}=1{,}2\cdot10^{-9}$ мм/цикл.

В дальнейшем под действием внешних нагрузок малые трещины увеличиваются в размерах и перемыкаются между собой, образуя крупную трещину.

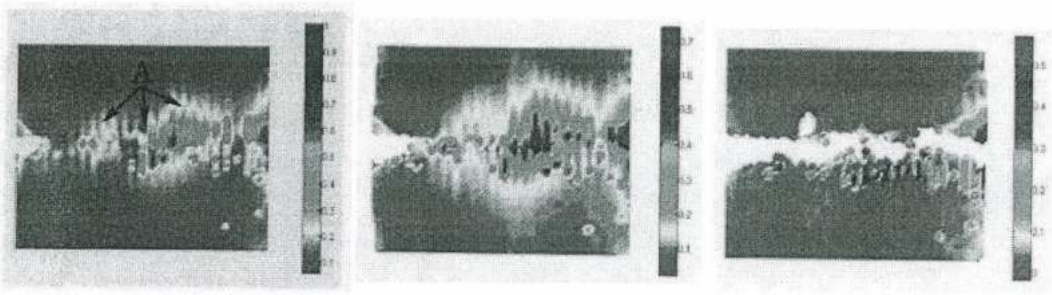


Рис. 4. Распределение напряжений при моделировании процесса образования трещины в направлении [110]:
а – 5000 шагов; *б* – 7000 шагов; *в* – 9000 шагов моделирования

С другой стороны, крупные трещины могут возникать и по другим механизмам. Для исследования данных механизмов из-за увеличения масштаба области исследований применяется крупномасштабное моделирование с числом атомов $N>10^8$ [7-12]. В данных работах доказано, что в районе вершины трещины возникает сверхупругость, исключающих применение линейной теории упругости для установления механизмов разрушения под действием динамических нагрузок. Теоретические основы явления сверхупругости исследовались в работе [3]. Однако, расхождения в значениях экспериментальных скоростей распространения трещин и скоростями, полученными в теории и моделировании, достигают 90 %. Причины данных расхождений до сих пор окончательно не установлены. Результаты исследований, приведенных в работе [13], позволяют максимально приблизиться к решению данной проблемы. В данной работе вводится понятие характерного масштаба длины для потока энергии вблизи вершины трещины. Утверждается, что локальная скорость сверхупругой волны регулирует скорость роста трещины при приближении сверхупругой зоны к длине характерной энергетической шкалы. Сверхупругая теория полностью меняет концепцию максимальной скорости роста трещины в классической теории. Модель моделирования сверхупругой области основана на бигармоническом потенциале, состоящем из двух констант. Один из потенциалов действует с малыми деформациями, другой – с большими деформациями. В результате получена упрощенная модель материала для сверхупругой зоны, что позволяет исследовать общие черты сверхупругости для широкого класса реальных материалов. Схема модели представлена на рис. 5.

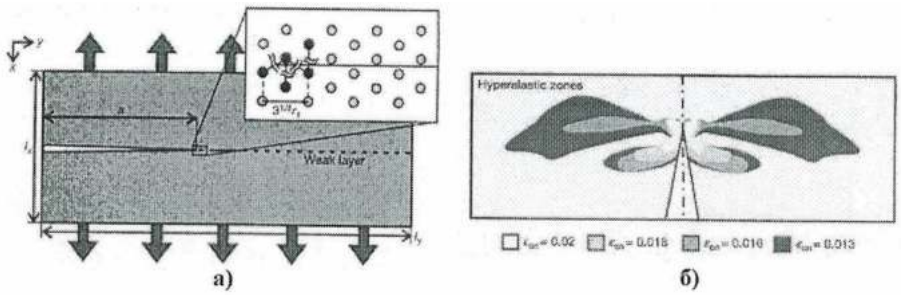


Рис. 5. Модельные представления (*а*) и результат моделирования (*б*) процесса образования и развития длинных трещин

Модель представляет собой кристаллит, состоящий из $7 \cdot 10^7$ атомов. Длина трещины $a=10^{-8}$ м – латентная стадия трещинообразования. Результаты моделирования представлены в относительных единицах. Гиперупругая зона характеризуется размером χ

$$\chi = \beta \frac{\gamma E_1}{\sigma^2}, \quad (2)$$

где $\chi \approx 750$; $\beta=87$ – отношение, характеризующее соотношение между сверхупругими и упругими свойствами;

E – модуль упругости;

γ – поверхностная энергия трещины $\gamma = \frac{G}{2}$, где G – динамическая энергия хрупкого разрушения, для стали $G=4 \cdot 10^3$ Дж/м^2; σ – приложенная динамическая нагрузка.

Установленная независимость действия параметров в формуле (2) позволяет получить значения критического напряжения $\sigma_{крит}$ для реализации механизма сверхупругости. В расчетах использовали значения модуля в сверхупругой зоне $E=4E_{упр}$ ($E_{упр}=2{,}15 \cdot 10^{11}$ Па). $\sigma_{крит}=2 \cdot 10^7$ Па$<\sigma_T=8 \cdot 10^7$ Па. Таким образом, сверхупругость в районе вершины трещины будет иметь место при трении во всем диапазоне исследованных температур, расширяя трещины, расположенные перпендикулярно поверхности трения.

Скорость распространения трещины U определяется величиной деформации ε и величиной сверхупругой зоны h. Значения относительной скорости U / C_R от деформации и отношения $\alpha = h / \chi$ приведены на рис. 6. а-б.

Скорость упругой волны приближается к скорости тепловой волны. Согласно проведенным в диссертации расчетам $U \approx 10^3$ м/с. Феномен сверхупругости играет большую роль для наноматериалов и высокоскоростного ударного нагружения, имеющему место в поверхностной зоне при трении.

С металловедческой точки зрения явление сверхупругости имеет место при превращении аустенита (γ-Fe) в мартенсит (α-Fe). Подобные превращения имеют место при более высоких давлениях ($\sigma \sim 10$ ГПа) и температурах (T~800 K), чем при моделировании. Эти различия можно объяснить действием масштабного фактора: число атомов в трещине при моделировании составляет несколько сотен.

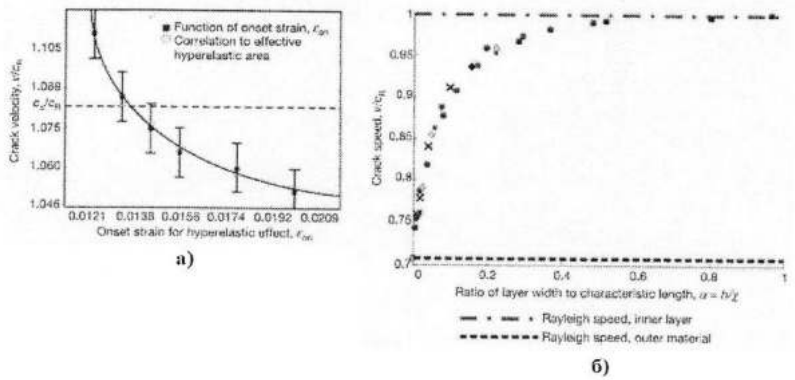


Рис. 6. Зависимость относительной скорости распространения трещины U / C_R от деформации *(а)* и относительной длины $\alpha = h / \chi$ *(б)* (U – продольная скорость упругой волны, C_R – сферическая скорость гиперупругой волны, $C_R=0{,}9225U$) [167]

Приведенные результаты показывают, что крупные трещины возникают при напряжениях $\sigma_{диф}<\sigma_T$, распространяются перпендикулярно поверхности трения со скоростью $V_{тр} \approx V_{зв}=6 \cdot 10^3$ м/с. Перемыкаясь с другими трещинами, образованными в дислокационно-упрочненной зоне, они образуют ячейки усталостного износа.

Библиографический список

1. **Rifkin, J.** XMD Molecular Dinamics Program [Electronic resource] / J. Rifkin // University of Connecticut, Center for Materials Simulation, Storrs, CT, 2002. 104 P. URL: http://xmd.SourceForge.net/ (accessed: 18.02.2011).

2. **Новиков, И.И.** Микромеханизмы разрушения металлов / И.И. Новиков, В.А. Ермишкин // – М.: Наука, 1991. – 368 с.

3. **Ханнанов, Ш.Х.** Микромеханизмы и кинетика развития пор в кристаллических материалах / Ш.Х. Ханнанов // Проблемы прочности. – 1982. – № 4. – С. 13–18.

4. **Лексовский, А.М.** Кинетика термофлуктуационного роста магистральной трещины в поликристаллической фольге пластичного материала / А.М. Лексовский, А.Н. Орлов // Физика металлов и металловедение. – 1982. – Т. 54. – № 3. – С. 553–559.

5. **Маленко, П.И.** Моделирование кооперативного механизма диффузии методом молекулярной динамики / П.И. Маленко [и др.] // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. – 2018. – Вып. 1. – С. 32–45.

6. **Makaev, R.I.** Atomic computer simulation of the structure of nanocrystals in a quasi-two-dimensional model / R.I. Makaev, A.A. Nazarov // Reviews on Advanced Materials Science. – 2006. – Vol. 11. – № 2. – P. 130–136.

7. **Abraham, F.F.** Instability dynamics in three-dimensional fracture: An atomistic simulation / F.F. Abraham [et al.] // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1997. – Vol. 45. – № 9. – P. 1461–1471.

8. **Rountree, C.L.** Atomistic aspects of crack propagation in brittle materials: Multimillion atom molecular-dynamics simulations / C.L. Rountree [et al.] // Annual Review of Materials Research. – 2002. – Vol. 32. – P. 377–400.

9. **Zhou, S.J.** Dynamic crack processes via molecular dynamics / S.J. Zhou [et al.] // Physical Review Letters. – 1996. – Vol. 76. – № 13. – P. 2318–2321.

10. **Heizler, S.I.** Mode-I fracture in a nonlinear lattice with viscoelastic forces / S.I. Heizler, D.A. Kessler, H. Levine // Physical Review E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics. – 2002. – Vol. 66. – № 1. – P. 016126-1– 016126-10.

11. **Abraham, F.F.** Simulating materials failure by using up to one billion atoms and the world's fastest computer: Work-hardening / F.F. Abraham [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2002. – Vol. 99. – № 9. – P. 5783–5787.

12. **Swadener, J.G.** Molecular dynamics simulation of brittle fracture in silicon / J.G. Swadener, M.I. Baskes, M. Nastasi // Physical Review Letters. – 2002. – Vol. 89. – № 8. – P. 085503-1.

13. **Buehler, M.J.** Hyperelasticity governs dynamic fracture at a critical length scale / M.J. Buehler, F.F. Abraham, H. Gao // Nature. – 2003. – Vol. 426. – № 6963. – P. 141–146.

УДК 621.896 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_202

Ю.Ф. Мигаль, д-р техн. наук, **В.В. Шаповалов,** д-р техн. наук, **Д.А. Рябыш, М.А. Буракова** канд. техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛОПЛАКИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Аннотация. *Одним из важных элементов, обеспечивающих безопасность эксплуатации вертолетов МИ-26Т, является шлицевое соединение хвостового вала. Для повышения надежности и эффективности работы шлицевых соединений предложен метод металлоплакирования в жидкой среде, путем введения в смазочный материал в определенном количестве мелкодисперсного порошка алюминия, также проведены квантово-химические расчеты когезии и адгезии в металлах. Реализована*

химическая анизотропия плакирующих пленок Al, позволяющая снизить интенсивность изнашивания рабочих поверхностей шлицевых соединений в 5…10 раз.

One of the important elements that ensure the safety of operation of MI-26T helicopters is the slotted connection of the tail shaft. To improve the reliability and efficiency of the splined joints, a method of metal plating in a liquid medium is proposed by introducing a certain amount of fine aluminum powder into the lubricant, and quantum chemical calculations of cohesion and adhesion in metals are also carried out. The chemical anisotropy of Al cladding films is realized, which allows reducing the wear rate of the working surfaces of the splined joints by 5-10 times.

Ключевые слова: шлицевое соединение, металлоплакирование, фреттинг-коррозия, износ, квантово-хичические расчеты, когезия, адгезия.
Keywords: slotted connection, metal plating, fretting corrosion, wear, quantum chemical calculations, cohesion, adhesion.

В настоящее время из-за износа деталей огромная часть машин, около 85…90%, выходят из строя. Расходы на ремонт машин и оборудования в нашей стране колоссальные и составляют десятки млрд. руб. в год, а при нынешнем развитии техники и технологии данная цифра соответственно увеличивается. Затраты на техническое обслуживание (ТО) и ремонт машин превышают их стоимость в разы. Как показывает практика, при правильном выполнении технических условий при эксплуатации техники, она даже при тяжелых условиях работы прослужит без аварий в течение многих лет. Однако, такие случаи единичны. В целом за весь срок службы машин на их ремонт приходится в 10 раз больше средств, чем на выпуск новых машин. Таким образом, для уменьшения затрат на ремонт необходимо повысить показатели надежности [1…4].

Одним из важных элементов, обеспечивающих безопасность эксплуатации вертолетов, в частности самого большого в мире МИ-26Т является шлицевое соединение хвостового вала (рис 1).

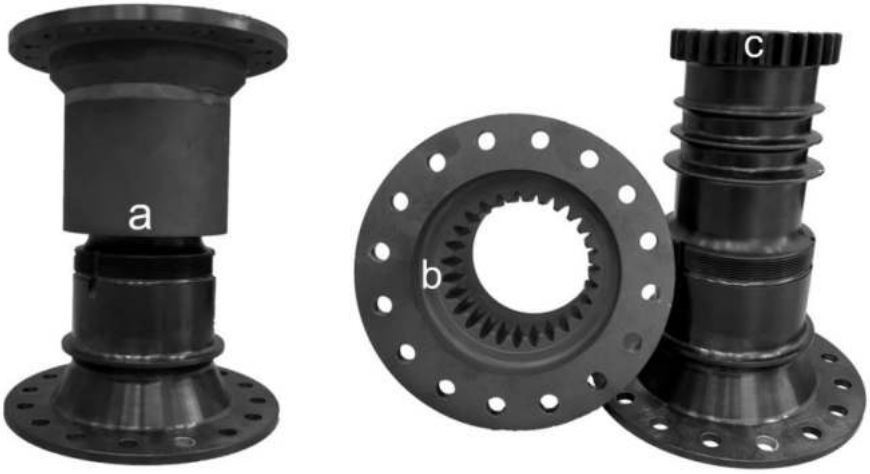


Рис. 1. Шлицевое соединение хвостового вала вертолета МИ-26Т:
a – муфта в сборе; *b* – шлицы стакана; *c* – шлицы наконечника

Исследованиями установлено, что основными неисправностями шлицевых соединений хвостовой трансмиссии вертолета МИ-26Т являются образование трещин и расслоений резиновой обоймы подшипника; подтекание смазочного материала из-под уплотнений шлицевых соединений и подшипника. В результате при высоких контактных напряжениях возрастают сопротивления, повышается коэффициент трения, что приводит к перегреву подшипника, муфты и её опоры, к деформации и износу деталей муфты; образованию бокового зазора в соединениях муфт, перекосу опоры хвостового вала, повышенному биению

трубы вала, к излому оси или скручиванию вала. Также при отсутствии смазочного материала может произойти схватывание рабочих поверхностей шлицевого соединения, что приведет к катастрофе и гибели людей.

В результате высокочастотного малоамплитудного относительного (реверсивного) движения стакана и наконечника на рабочих поверхностях шлицевого соединения возникают условия для реализации их износа в виде фреттинг-коррозии [5]. Очевидно, причиной фреттинга является реверсивное высокочастотное относительное смещение с амплитудой, не превышающей 0,3 мм. В свою очередь, применяемое для разделения рабочих поверхностей шлицевого соединения стакана и наконечника гипоидное масло активно формирует в процессе реверсивного низкоамплитудного высокочастотного взаимодействия контактирующих поверхностей и микротурбулентных процессов смазочную пленку, состоящую из присадок и элементов-пассиваторов, прежде всего кислорода. Кислород присутствует в гипоидном масле в молекулярном и химически связанном видах.

В связи с этим в процессе относительного смещения металлических поверхностей, особенно в реверсивном движении в гипоидном масле происходит активация кислорода. В свою очередь, реверсивное малоамплитудное относительное движение высоконагруженных металлических легированных поверхностей трения создает условие для протекания процесса окисления (коррозии) при наличии в масле кислорода. Предлагается с целью снижения интенсивности фреттингового окисления в состав гипоидного масла «ТСгип» в определенном оптимизированном соотношении ввести порошок алюминия с размером частиц 30 мкм для обеспечения металлоплакирования [2] в жидкой среде, однако, сначала необходимо провести квантово-химический анализ и расчеты когезии и адгезии в металлах.

Современные квантово-химические методы [3, 4, 6] позволяют проводить расчеты прочности химической связи различных многоатомных объектов (молекул и твердых тел) с точностью, сопоставимой с точностью экспериментальных измерений прочности таких объектов. В случае твердых тел это утверждение относится в основном к бездефектным структурам, не имеющим локальных дефектов.

Важными для подтверждения точности полученных расчетов является их сопоставление с известными экспериментальными данными – температурой плавления, которая интегрально характеризует прочность межатомных связей в металле, и пределом механической прочности металлов, которая также зависит от прочности межатомных связей. Более надежной экспериментальной величиной в данном случае следует считать температуру плавления, поскольку она в гораздо меньшей степени зависит от дефектности металлов, чем экспериментально измеренный предел прочности.

Результаты квантово-химических расчетов когезии и адгезии в системах, содержащих элементы железа Fe, меди Cu, алюминия Al и цинка Zn представлены 5-слойной системой с трансляционной симметрией кристаллической решетки (рис. 2).

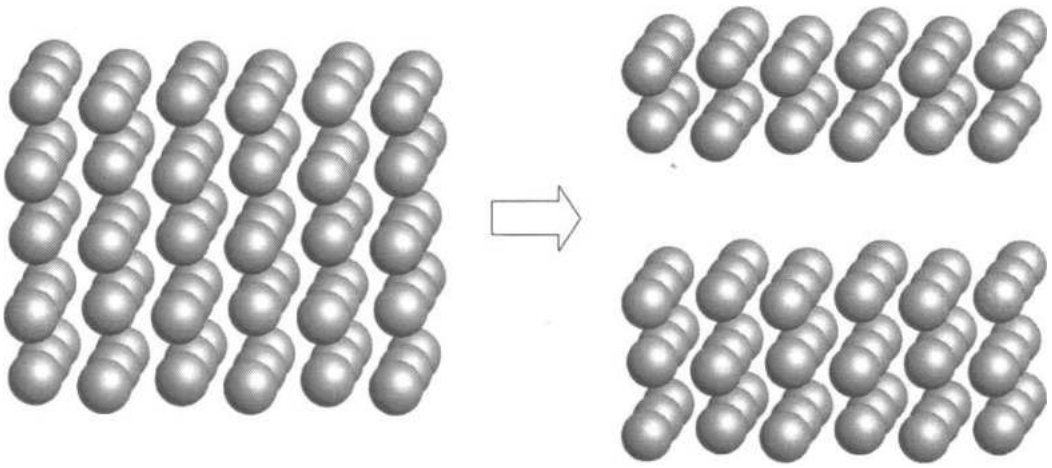


Рис. 2. Модельная система для расчета когезии (на примере алюминия)

Горизонтальные слои представляют собой двумерную периодическую структуру. Изображены 9 ячеек этой структуры.

Энергия разрыва ячейки определяется по формуле: $\Delta E = E$ (5 слоев) – E (3 слоя) – E (2 слоя). А Удельная энергия когезии – $E_{ког.} = \Delta E / S_{ячейки}$.

Полученный ряд металлов *Fe, Cu, Al, Zn,* расположенных по уменьшению их прочности, полностью согласуется с известными экспериментальными данными [4, 6…8].

При расчете адгезии принимаем, что атомы первых слоев металла, наносимого на основной металл, обладают той же симметрией, что и атомы основного металла (рис. 3).

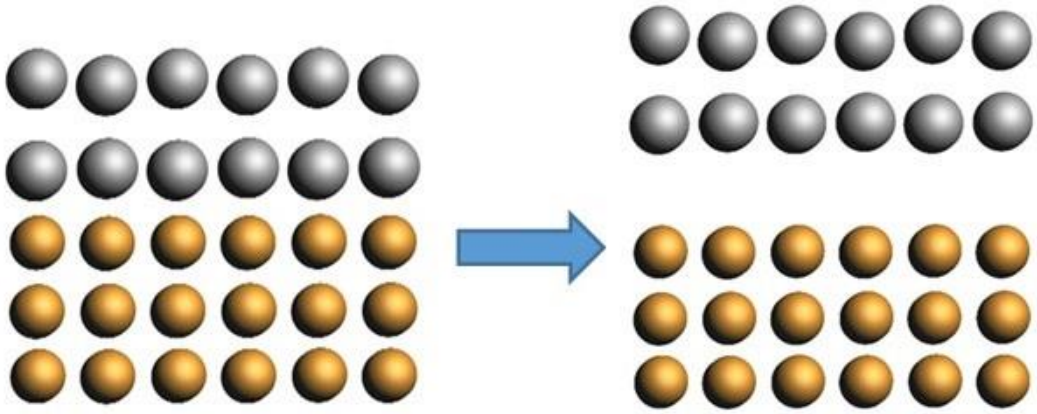


Рис. 3 Модельная система для расчета адгезии алюминия на меди

Адгезия с учетом диффузии, ее модельная схема представлена на рис. 4.

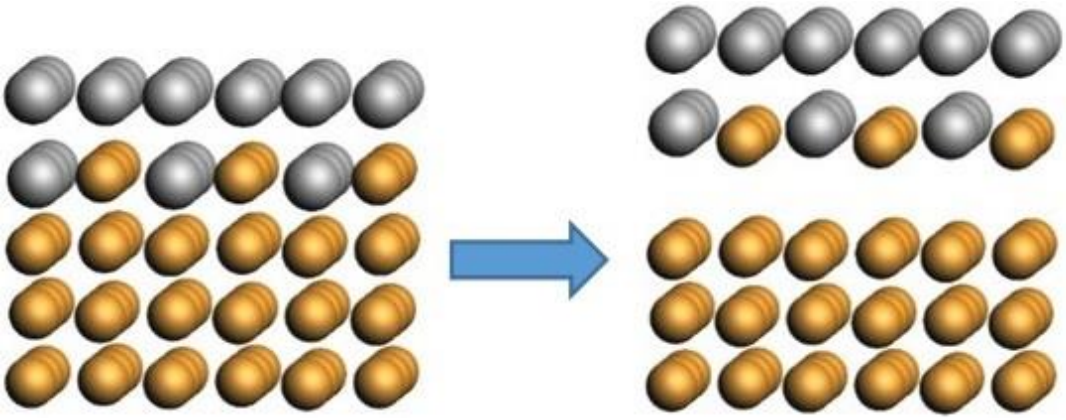


Рис. 4. Модельная система для расчета адгезии алюминия на меди с учетом диффузии

В ходе исследования была построена модельная система и выполнены расчеты адгезии алюминия на железе (рис. 5).

Также построена модельная система и произведены расчеты адгезии оксида алюминия на алюминии (рис. 6).

При добавлении мелкодисперсного порошка алюминия в определенном количестве в смазочный материал, то наличие кислотных и основных центров на поверхности оксида алюминия будет способствовать более прочной адсорбции присадок из объема смазочного материала, и, следовательно, повышению триботехнических свойств масла.

В результате деформации в нормальном направлении фрагменты оболочки частиц *Al* в виде Al_2O_3 распределяются по поверхности плоской чешуйки *Al* в соотношении $S_{Al} / S_{Al_2O_3} = 10^3$.

Данное соотношение позволяет реализовать условия плакирования *Al* поверхностей шлицевого соединения за счет превышения сил адгезии *Al* с *Fe* [1, 4, 6…8], величина которых значительно ниже сил когезии в объеме *Al*. Ювенильная (неокисленная) поверхность закрепленной частицы *Al* в результате реверсивного нагруженного относительного движения рабочих поверхностей шлицевого соединения активно окисляется кислородом – $4Al + 3O_2 = 2Al_2O_3$. Данный кислород поступает из гипоидного масла, что снижает интенсивность коррозии рабочих поверхностей шлицевого соединения. В свою очередь, образование на рабочих поверхностях высокопрочной ($h \approx 0{,}1$ нм) нанопленки [8] Al_2O_3 эффективно защищает от фреттинга [5] (усталостных разрушений) рабочие поверхности шлицевого соединения привода хвостового винта. Нанопленки закрепляются на шлицах стакана или наконечника при пульсации нагрузки от 0 до 100 МПа, преимущественно в местах аномального изнашивания. Данное явление возникает из-за так называемого «краевого эффекта», связанного с перекосом контактирующих рабочих поверхностей шлицевого соединения.

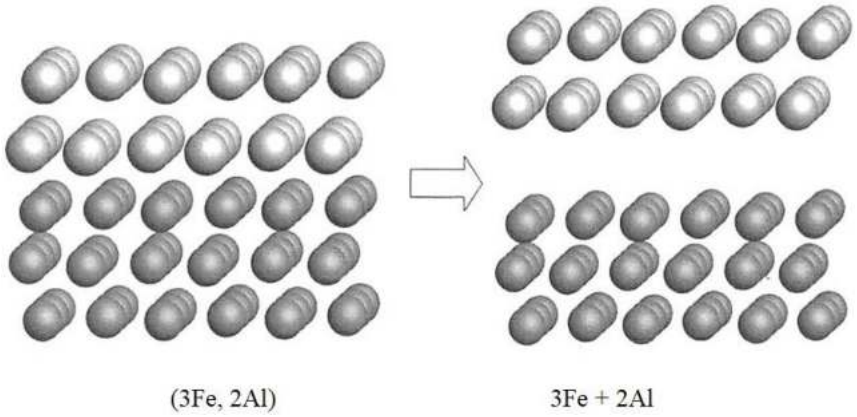


Рис. 5. Модельная система для расчета адгезии алюминия на железе

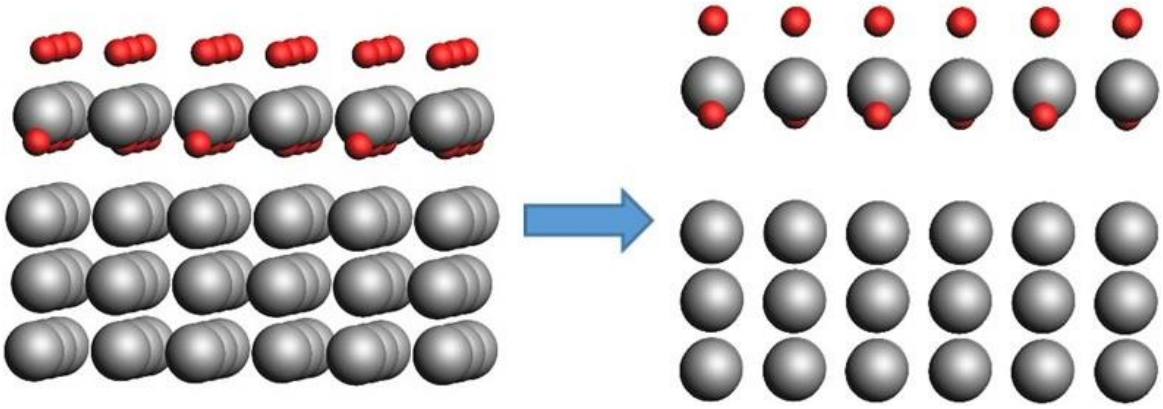


Рис. 6. Модельная система для расчета адгезии оксида алюминия на алюминии

Таким образом, реализуя химическую анизотропию плакирующих пленок *Al*, возможно снизить в 5…10 раз интенсивность изнашивания рабочих поверхностей шлицевых соединений. Использование твердого смазочного материала позволяет эксплуатировать технические средства в широком температурном диапазоне. А также наличие кислотных и основных центров на поверхности оксида алюминия будет способствовать более прочной адсорбции присадок из объема смазочного материала, и, следовательно, повышению триботехнических свойств масла.

Ссылка на грант

Работа выполнялась в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса

России на 2014-2020 годы» при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки и высшего образования России (идентификатор проекта RFMEFI60718X0203).

Библиографический список

1. **Шаповалов, В.В.** Повышение эффективности шлицевых соединений технических систем / В.В. Шаповалов, А.С. Силаков, Д.А. Рябыш // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2020)». – ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 371-375. Электронный ресурс https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44058427.

2. Способ термоплакирования стальных поверхностей трения: пат. 2740465 РФ; МПК B61K 3/02 (2006.01) / В.В. Шаповалов [и др.] // заявитель и патентообладатель В.В. Шаповалов. № 2019145543; заявл. 30.12.2019; опубл. 14.01.2021, Бюл. № 2. Электронный ресурс https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44700186_48792397.PDF.

3. Компьютерное моделирование взаимодействия силикатных и фосфатных присадок методом квантово-химического анализа и молекулярной динамики / И.А. Майба [и др.] // Инженерный вестник Дона. – № 3 (50). – 2018. – 16 с. Электронный ресурс https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36651497_44136941.pdf.

4. Metal cladding of friction surfaces in liquid media / V.V. Shapovalov [et al.] // IOP Publishing Ltd. 13. "XIII International Scientific Conference "Tribology for Mechanical Engineering", TriboMash 2020". – 2020. – P 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/996/1/012022.

5. **Hady, H.** The role of surface roughness during fretting corrosion of 316L stainless steel / H. Hady, A.S. Hammood, L. Thair // Materials Today: Proceedings, Volume 42, Part 5, 2021, 2326-2333, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.323.

6. **Мигаль, Ю.Ф.** Квантово-химический анализ прочности межатомных связей на большеугловых границах зерен в железе / Ю.Ф. Мигаль, В.И. Колесников / Наука Юга России. – 2018. – Т.14. – № 4. – С. 46 - 52. DOI: 10.7868/S25000640180406.

7. **Kolesnikov, V.I.** Metal-Polymer Cladding Technology for Metal Friction Surfaces / V.I. Kolesnikov, V.V. Shapovalov, D.A. Ryabysh // Materials Today: Proceedings. – 19P5. – 2019. – pp. 2228 - 2231.

Оптимизация антифрикционных смазочных материалов на базе нанотехнологий / М.А. Буракова [и др.] // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2019)». – ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, – 2019. – С. 284-288. Электронный ресурс https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41193465.

УДК 539.621 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_207

А.В. Морозов, канд. техн. наук (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН)

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЯМОЧНОЙ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ФАНЕРЫ НА ЕЕ СЦЕПНЫЕ СВОЙСТВА В СУХИХ И ВЛАЖНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

Аннотация. *В работе проведено экспериментальное исследование сцепных свойств ламинированной березовой фанеры, поверхность которой была текстурирована выемками, отличающимися своими размерами. Эксперимент был проведен в сухих и смазанных условиях трения в диапазоне удельных нагрузок от 0,1 до 0,5 МПа при комнатной температуре. В работе показано, что как для сухого трения, так и для трения при наличии смазочной среды увеличение размеров выемок текстуры приводит к снижению сцепных свойств лицевой поверхности фанеры. Однако, нанесение текстуры способствует отводу жидкости из контакта, поэтому ее нанесение оправдано при эксплуатации фанеры при наличии технических загрязнений на ее поверхности.*

In this paper, an experimental study of the coupling properties of laminated birch plywood, the surface of which was textured with recesses differing in their sizes, was carried out. The experiment was carried out in dry and lubricated friction conditions in the range of specific loads from 0.1 to 0.5 MPa at room temperature. The paper shows that for both dry friction and friction in the presence of a lubricating medium, an increase in the size of the texture recesses leads to a decrease in the coupling properties of the front surface of plywood. However, the application of texture contributes to the removal of liquid from the contact, so its application is justified when using plywood in the presence of technical contamination on its surface.

Ключевые слова: Березовая фанера, текстурирование, сцепление, трение.
Keywords: Birch plywood, texturing, adhesion, friction.

Многослойные древесно-слоистые плиты (фанеры) используются как строительный материал в различных областях и приложениях. Одним из применений фанеры является устройство полов транспортных средств (городских автобусов, автомобильных прицепов, вагонов поездов и др.). Однако, поверхность фанеры подвержена истиранию и влиянию природных факторов. Эффективным способом защиты рабочих поверхностей фанеры является применение износостойких влагостойких покрытий – ламинированных пленок, некоторые из которых уменьшают сцепные свойства лицевой поверхности фанеры. Сцепные свойства ламинированного полимерного покрытия зависят от шероховатости, текстуры и его адгезионных характеристик. Данное исследование направлено на экспериментальное определение сцепных свойств текстурированных ламинированных фанер, которые применяются для изготовления полов автофургонов, троллейбусов и т.д. С этой целью в сухих и влажных условиях трения проводятся определение коэффициента трения для нескольких образцов фанеры, которые отличаются нанесенной на их поверхность текстурой, выполненной в форме ямок с разными геометрическими размерами.

Материалы

Для изготовления испытуемых образцов из листа ламинированной березовой фанеры, имевшего толщину 15 мм, при помощи фрезерного станка были вырезаны диски диаметром 80 мм. Поверхность фанеры имела систему ямок, которые были изготовлены через металлическую сетку методом прессования в процессе нанесения ламинирующей защитной пленки на поверхность фанеры. Увеличивая или уменьшая нагрузку прессования возможно получить ямки большего или меньшего размера. В данном исследовании группе образцов-дисков, которые имели на поверхности ямки меньшего размера был присвоен номер 1, а образцам с ямками большего размера номер 2 (рис. 1). В качестве контробразца в работе использовалась протекторная резина легковой автомобильной шины.

Геометрические размеры ямок были измерены на бесконтактном профилометре Sensofar S Neox (Испания). Прибор оснащен предметным столиком, который позволяет в автоматическом режиме сшивать сфотографированные изображения. Имеющейся объектив обеспечивал получение единичного изображения с видимым полем размерами 1,7 на 1,4 мм, а использование предметного столика сделало возможным сшивание шестидесяти четырех рядом лежащих изображений так, что конечная исследуемая область поверхности образца имела размеры 8,9 на 8,6 мм. При помощи инструментов, входящих в программное обеспечение прибора, были определены размеры ямок, но перед этим полученное изображение было обработано, а именно: методом трех точек была вычтена плоскость с целью удаления компоненты формы, а также экранированы шумы при помощи встроенных фильтров программного обеспечения профилометра. Проведенные измерения ямок (см. рис.1) позволили оценить в мм их длину, ширину и глубину, которые для образцов первой группы составили 1,4x0,7x0,15, а для образцов второй группы 1,7x0,9x0,8. Следует отметить, что шаг между ямками для обоих групп образцов не изменялся и составлял 2,1 мм. Микрошероховатость поверхности между ямками в среднем составляла по Sa = 17,9 мкм.

Отметим, что сто микрошероховатость в данной работе измерялась по стандарту ISO 25178 на всей площади полученного изображения (рис. 1).

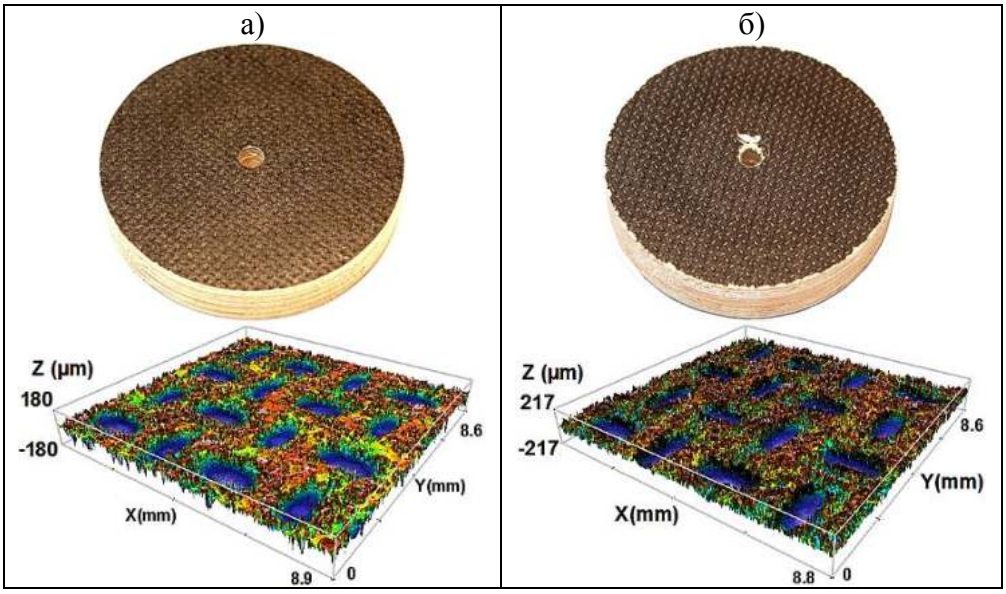


Рис. 1. Фотографии и рельеф поверхности испытываемы образцов, где *а)* – образец из группы №1 и *б)* – образец из группы №2.

Методика трибологических испытаний

Эксперименты по определению коэффициента трения были выполнены на трибометре, на котором была реализована схема контакта – торцевое верчение образца-диска относительно неподвижного резинового кольца (рис. 2).

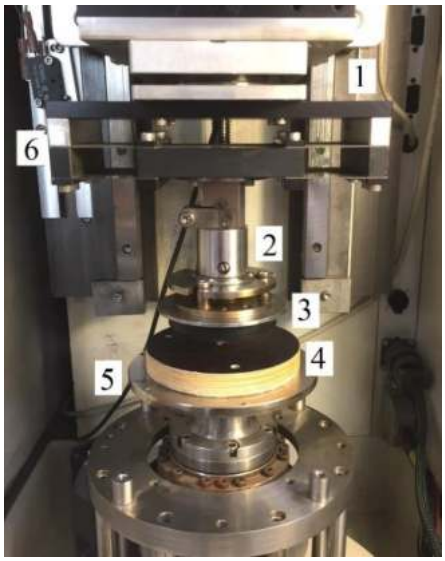


Рис. 2. Фотография испытуемого узла трения, где *1* – тензометрический датчик сил, *2* – самоустанавливающейся держатель контробразца, *3* – резиновый контробразец, *4* – образец -диск, *5* – предметный столик трибометра, *6* – демпфирующий элемент.

Шаговый электродвигатель посредством шарико-винтовой передачи задает нормальную нагрузку в узле трения (рис. 2), который состоит из неподвижного резинового контробразца 3 и подвижного образца-диска 4. Контробразец осесимметрично смонтирован в своем держателе 2, который обеспечивает самоустановку в процессе фрикционного взаимодействия контробразца с движущимся образцом. В свою очередь держатель 2 через

упругий элемент 6 крепится к тензометрическому датчику 1. При помощи датчика регистрируются действующие в узле трения силы, а именно: нормальная нагрузка и момент трения. Отметим, что упругий элемент 6 защищает датчик от потенциальных кратковременных воздействий со стороны пары трения, а также нивелирует биения, вызванные не плоскопараллельностью испытуемых тел. С целью проведения исследований при наличии смазки в контакте на предметный столик трибометра монтируется смазочный контейнер, который обеспечивает проведений испытаний при полном погружении пары трения в смазочную среду. В настоящей работе в качестве смазочной среды использовался 20% раствор жидкого мыла в дистиллированной воде. Предметный столик трибометра при помощи шагового электродвигателя и волнового редуктора позволяет проводить испытания материалов в диапазоне линейных скоростей скольжения от 0,001 до 200 мм/с при максимальном крутящем моменте до 20 Н·м. Следует отметить, что в данном исследовании образец-диск после каждого единичного теста (например, при увеличении нагрузки) возвращался в исходное положение, таким образом обеспечивалось перемещение текстуры поверхности образца в исходное положение, тем самым сохраняя первоначальные равные условия испытаний. Показателями процесса фрикционного взаимодействия в измерительной системе трибометра являются непрерывная запись нормальной нагрузки, момента трения и числа совершенных оборотов.

Испытание образцов осуществлялось при комнатной температуре T = 23±3 °С по заданной оператором программе в автоматическом режиме, при этом для испытания одного образца фанеры выполнялся 21 тест, соответствующий 3 уровням давлений P, изменяемых в диапазоне 0,1 … 0,5 МПа и 7 скоростям скольжения V, варьируемых от 0,01 до 1 мм/с. Подчеркнем, что диапазон малых скоростей скольжения выбран исходя из соображений достоверной оценки коэффициента трения, на который безусловно влияет скорость приложения тангенциального усилия, но в большинстве практических случаев определяется при небольших скоростях смещения, как, например, в стандарте ISO 8611-1–2014 по испытанию деревянных поддонов и поддонов из композиционных материалов на основе древесины. Путь трения образца задавался равным 1/4 оборота предметного столика трибометра.

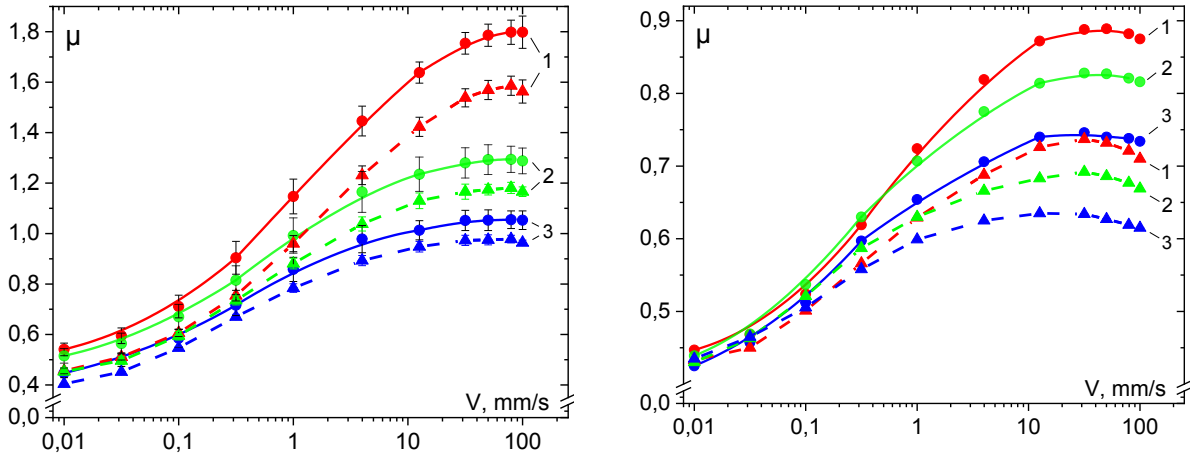
Результатом выполнения одного теста является зависимость коэффициента трения μ от времени испытания, при этом графики могут иметь различный вид, зависящий от скорости скольжения [1]. Коэффициента трения определялся на участке, на котором происходит скольжение образца фанеры относительно неподвижного резинового контробразца. В результате обработки единичного теста получалось среднее значение коэффициента трения, определенное на участке с установившемся режимом трения.

Результаты и их обсуждение

Измеренные значения коэффициентов трения для сухих и влажных условий трения, всех значений скоростей скольжения и нормальных давлений представлены на рис. 3.

Анализ полученных данных (рис. 3) позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, коэффициент трения возрастает с увеличением скорости скольжения. Это наблюдение объясняется природой вязкоупругого трения [3] между резиной и поверхностью фанеры. При этом влияние скорости скольжения на коэффициент трения становится менее значительным при малых скоростях - этот факт объясняется в работе [4], из которой следует, что при малых скоростях скольжения динамический коэффициент трения приближается к статическому. Во-вторых, с увеличением нормальной нагрузки коэффициент трения уменьшается; такое поведение связано с совместным проявлением гистерезисных и молекулярных свойств эластомера. В-третьих, экспериментально установлено, что в условиях как сухого, так и влажного трения в исследованном диапазоне скоростей и нагрузок увеличение текстуры (ширины и глубины выемок) приводит к уменьшению коэффициента трения. Этот эффект возможно объяснить снижением площади фактического контакта между взаимодействующими телами. В-четвертых, введение жидкости в контакте приводит к

значительному снижению коэффициента трения, что объясняется снижением адгезионного механизма трения и хорошо согласуется с результатами моделирования.



(а) *(б)*

Рис. .3. Зависимости коэффициента трения μ от скорости скольжения V для сухих *(а)* и влажных *(б)* условий трения для образцов фанеры №1 (сплошные линии) и №2 (пунктирные линии), где *1* – P = 0,1 МПа, *2* – P = 0,3 МПа, *3* – P = 0,5 МПа.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование влияния макрорельефа на коэффициент трения между эластомером и ламинированной березовой фанеры. Испытания были проведены при T = 23 ºC в интервале давлений P = 0.1 … 0.5 МПа и диапазоне скоростей смещения V = 0.01 … 100 мм/с. В работе было получено, что в условиях сухого контакта коэффициент трения увеличивается с ростом скорости скольжения и снижается с увеличением нормальной нагрузки. Введение смазочной среды в контакт приводит к снижению уровня коэффициента трения, однако его характер с увеличением нагрузки и скорости скольжения не изменяется. Увеличение геометрических размеров ямок на лицевой поверхности фанеры приводит к снижению коэффициента трения. Следует отметить, что нанесение текстуры способствует отводу жидкости из контакта, поэтому ее нанесение оправдано при эксплуатации фанеры при наличии технических загрязнений на ее поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-01-00231 «Теоретико-экспериментальное исследование контактного взаимодействия деформируемых тел с нанесенным рельефом в условиях трения покоя и скольжения».

Библиографический список

1. **Морозов, А.В.** Влияние адгезионных свойств и текстуры поверхности ламинированной фанеры на коэффициент трения с резиной / А.В. Морозов, Ю.Ю. Маховская, К.С. Кравчук // Трение и износ. – 2021. –№.4. – С.437-449.

2. **Морозов, А.В.** Методика оценки коэффициента трения уплотнительных морозостойких резин / А.В. Морозов, Н.Н. Петрова // Трение и износ. – 2016. – № 2. – С.162–167.

3. **Гент, А.Н.** Пневматическая шина / А.Н. Гент, Д.Д. Уолтер // Перевод с английского. - М.: НТЦ “НИИШП”. – 2015. – 746 с.

4. **Savkoor, A.R.** On the friction of rubber / A.R. Savkoor // Wear. – 1965. – №3. pp. 222–237.

УДК 621.9 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_212

А.Г. Наумов, д-р техн. наук, **С.А. Сырбу,** д-р хим. наук, (*Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС РФ*)

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ РАДИКАЛЬНО-ЦЕПНОГО МЕХАНИЗМА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССАМ ЛЕЗВИЙНОГО РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. *Представлены теоретические и экспериментальные результаты исследований, уточняющие положения существующей теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств на процессы лезвийного резания материалов.*

Theoretical and experimental research results are presented, clarifying the provisions of the existing theory of the action of lubricating and cooling technological means on the processes of blade cutting of materials.

Ключевые слова: Трибология резания материалов, смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), физика контактных явлений при использовании СОТС, активация СОТС, поверхностные явления при резании металлов, нанотехнологии при использовании СОТС, технологии и экология применения СОТС.
Keywords: Tribology of metal cutting, cutting fluids, the physics of contact phenomena with the use of the cutting fluids, activation of the cutting fluids, metal cutting surface-related phenomena, cutting fluid-used nanotechnologies, cutting fluid-based technologies and ecology.

Повышение работоспособности режущих инструментов и качества обработанных поверхностей в процессах лезвийной обработки металлов во многом определяется интенсивностью адгезионных взаимодействий между трибосопряженными поверхностями инструментального и обрабатываемого материалов. Это обусловлено высокой химической активностью образующихся в процессе стружкоотделения ювенильных поверхностей в трибосопряженном контакте. Как показывают теория и практика, одним из основных механизмов влияния на величину адгезии является формирование на границе раздела инструмент - обрабатываемый материал разделительных смазочных пленок путем введения в контактную зону внешних технологических средств (СОТС).

Согласно теории радикально-цепного механизма [1] ювенильные поверхности, образованные при трении и резании металлов, не только проявляют большую активность к физической адсорбции и химическим реакциям, но и излучают поток энергетических частиц (электронов, квантов излучения), интенсивность которого максимальна в момент вскрытия слоев. Эти частицы оказывают существенное влияние на протекание химических процессов, происходящих на контактных поверхностях режущего инструмента и обрабатываемого материала.

В результате их взаимодействия с молекулами внешней среды происходит активация последних и распад с образованием реакционных частиц - активных атомов, радикалов и радикальных групп, активность которых обусловлена наличием на валентной оболочке атома электрона с нескомпенсированным спином. Обладая высокой химической активностью, эти частицы взаимодействуют с ювенильными поверхностями, результатом чего является интенсивное образование композиций (вторичных структур), основная функция которых заключается в разделении чистых металлических поверхностей, т.е. в снижении адгезионных взаимодействий.

Образование химических радикалов может происходить как естественным, так и принудительным путем. Общие закономерности процессов принудительного образования радикалов практически не отличаются от естественного. В результате внешних воздействий

на СОТС ее компоненты получают дополнительную энергию, что переводит их в метастабильное (промежуточное) состояние, которое характеризуется ослаблением или частичным нарушением внутримолекулярных связей элементов СОТС.

Одним из важнейших выводов данной теории является то, что смазочные пленки образуются только в условиях контактной зоны, где имеются необходимые условия для ее реализации. Следовательно, для инициирования смазочного эффекта вполне достаточно лишь небольшого количества внешней среды.

Это положение было неоднократно подтверждено как непосредственно авторами настоящей работы, так и другими отечественными и зарубежными исследователями и производственниками. Так, проведенными исследованиями по влиянию на процесс резания распыленных СОЖ было установлено, что для обеспечения смазочного действия достаточно подавать 0,5-3,0 г/час распыленного масла или 50-150 г/час распыленной водоэмульсионной СОЖ (1 г распыленной жидкости имеет такую же поверхность, какую имеют 27 кг нераспыленной) [2]. Н.Н. Зоревым [3] при изучении влияния воды на процесс резания стали было установлено, что капля воды оказывает на процесс резания такое же действие, как струя с расходом в несколько литров.

Нашими исследованиями [4], направленными на изучение смазочной способности наноразмерных йодсодержащих структур, предварительно сформированных в поверхности инструментов, зафиксировано значительное улучшение характеристик процесса резания и повышение работоспособности быстрорежущих инструментов на различных операциях механической обработки (рис. 1).

Второй вывод основывается на том положении, что объем смазочных пленок, образованных в результате радикально-цепных реакций, должен быть достаточным для осуществления смазочного действия, т.е. находится в прямой зависимости от количества в контактной зоне активных атомов и радикалов. При прочих одинаковых условиях концентрация активных частиц определена энергией связи в молекулах внешней среды и работой выхода электрона компонентов СОТС.

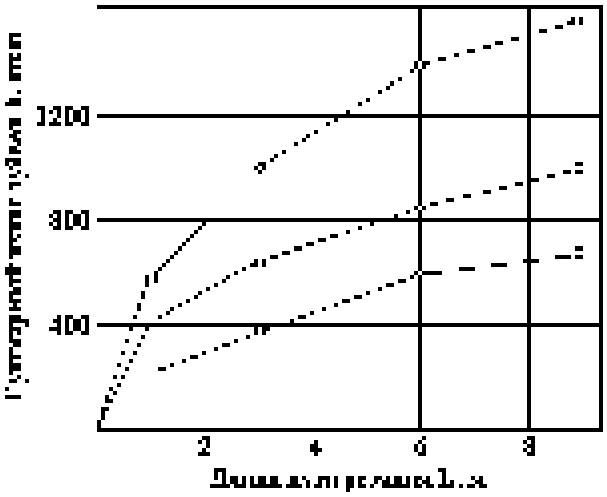


Рис. 1. Динамика изменения суммарного износа зубьев фрезы из стали Р9 от длины пути резания при фрезеровании пазов в углеродистой стали У8 без применения СОТС: *1* – без дополнительного упрочнения; *2* – упрочненных химико-термической обработкой; *3* – упрочненных химико-термической обработкой с дополнительным введением в насыщающую атмосферу паров йода в количестве 0,05 масс. %. V = 1,6 м/с, S = 315 мм/мин

Так, на рис. 2 представлены результаты исследований по использованию в качестве технологического средства микродоз СОТС, каждая из которых имела оболочку из непроницаемого для нее материала - в виде микрокапсул, размеры которых варьировались в

пределах от 1 до 45-50 мкм [5]. Для повышения эффективности такой СОТС микрокапсулы были наделены возможностью направленного движения к режущему клину инструмента. В ходе исследований установлено, что оптимальный расход микрокапсул находился в пределах 5,5 – 8,5 г/час. Таким образом, уменьшение количества подаваемой в контактную зону СОТС по сравнению с традиционно используемыми средствами составило более, чем 10000 раз. При этом было зафиксировано увеличение в 1,5-2,0 раза стойкости инструментов.

Представленные зависимости наглядно показывают, что существует определенный диапазон концентраций микрокапсул, в котором стойкость инструментов с увеличением количества СОТС возрастает. Преодоление некоторого критического значения концентрации микрокапсул приводит к стабилизации стойкостных показателей, и при дальнейшем увеличении их количества стойкость режущего инструмента практически не изменяется.

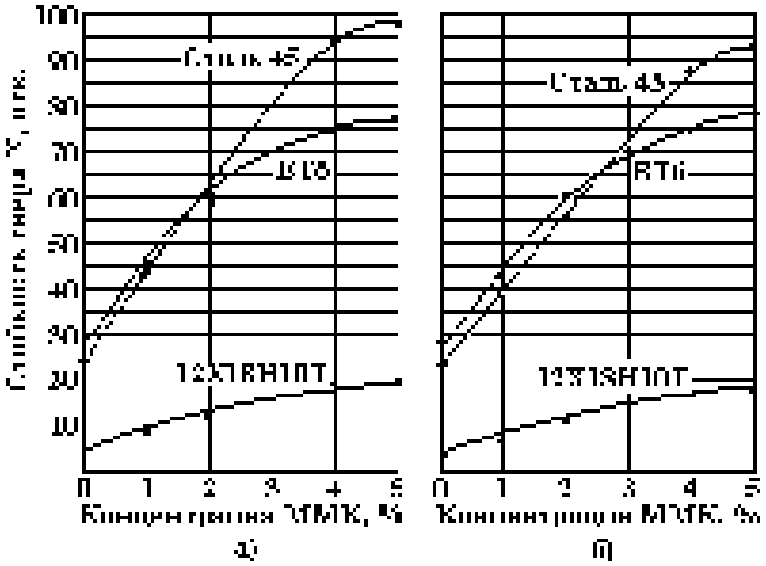


Рис. 2. Зависимости стойкости сверл из стали Р6М5 от концентрации микрокапсул в носителе:
а) при V = 4,71 м/мин; *б)* при V = 6,28 м/мин

Как отмечалось выше, для активного образования разделительных смазочных пленок необходимо, чтобы в контактной зоне имелось достаточное количество активных частиц, участвующих в этом процессе. Задача по интенсификации образования реакционных частиц в контактной зоне была решена посредством предварительной передачи отдельным элементам технологической среды энергии путем воздействия на СОТС различными физическими и химическими методами – физической и химической активацией СОТС [6]. В результате этого молекулы СОТС переходили в возбужденное состояние до зоны контактирования, и дальнейшего естественного энергетического воздействия на них со стороны контактной зоны становилось вполне достаточно для их деструкции с последующим образованием химически активных атомов и радикалов. Методы активации СОТС являются наиболее актуальными для веществ с большими значениями энергии связи между атомами в молекулах.

В последнее время большое внимание уделяется применению в качестве СОТС атмосферного воздуха, активированного действием коронного разряда [7, 8 и др.]. Наблюдаемый эффект объясняется облегчением условий трибосопряжения между инструментом и обрабатываемым материалом за счет смазочного действия оксидных структур, инициатором образования которых являются активный кислород и гидроксильные группы, образующиеся в результате воздействия на воздух коронного разряда. Однако, при этом авторы исследований не принимают во внимание, что состав воздуха достаточно сложен.

Основные составные части воздуха можно разделить на три группы: постоянные, переменные и случайные [9]. К первым относятся кислород (порядка 21 %), азот (около 78 %) и инертные газы (около 1 %). Содержание этих компонентов практически не зависит от места

взятия пробы. Ко второй группе относится углекислый газ (0.02-0.04 %) и водяной пар (до 3 %). Содержание случайных составных частей (третья группа) зависит от местных условий. Часто бывают примешаны продукты работы промышленности и транспорта, продукты жизнедеятельности биологических объектов (микроорганизмов, растений, животных и т.п.).

Нашими исследованиями определено, что каждая из этих составных частей воздуха в той или иной мере оказывает влияние на характеристики процесса лезвийного резания. Так, установлено, что наличие влаги в воздухе способствует значительному повышению стойкости режущих инструментов, причем максимальное увеличение наблюдается при низкой концентрации водяных паров (рис. 3). Предварительная активация увлажненного воздуха коронным разрядом приводит к еще большему повышению стойкости инструментов.

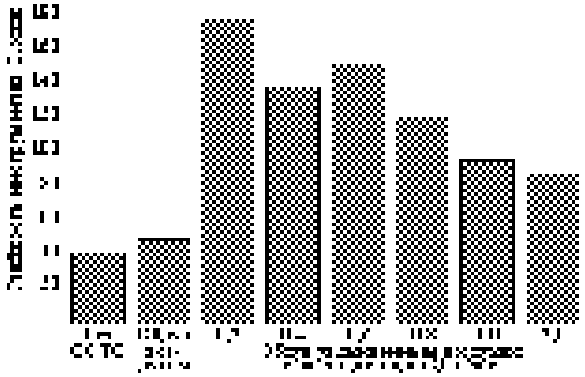


Рис. 3. Стойкость быстрорежущего инструмента при резании стали 45 с обдувом контактной зоны увлажненным воздухом V = 1.2 м/с, t = 0,5 мм, S = 0,1мм/об.

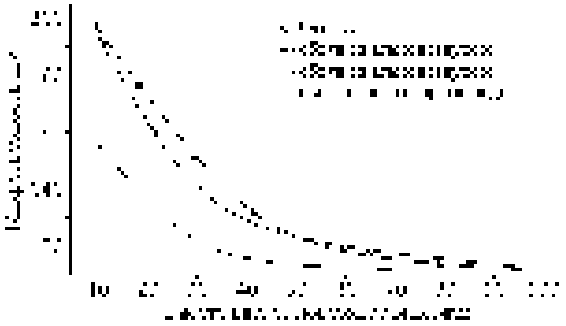


Рис. 4. Изменение величины и микротвердости зоны пластической деформации при точении титана ВТ1-0 V = 0.5 м/с, t = 0,5 мм, S = 0,1мм/об

Наличие и величина зон пластической деформации является одним из основных параметров, характеризующих интенсивность адгезионных взаимодействий между рабочими поверхностями инструмента и обрабатываемым материалом. В определенных условиях по этому показателю также можно оценить эффективность действия разделительных смазочных пленок. Так, анализ представленных на рис. 4 экспериментальных кривых показывает, что использование в качестве СОТС увлажненного воздушного потока приводит к уменьшению глубины искажения матричной структуры обрабатываемого материала. Это можно интерпретировать как уменьшение силы сцепления при адгезии. Одновременно в экспериментах фиксировалось и уменьшение микротвердости искаженного стоя, что показывает на количественное уменьшение точек схватывания контактных поверхностей.

Подобное улучшение характеристик зоны резания и стойкости инструментов наблюдается и в случае введения в воздушный поток органических соединений, например – индустриального масла И-20А в концентрациях 0,1 – 1,0 г/час. Отмечено повышение стойкости резцов, уменьшение утолщения стружки и шероховатости обработанной поверхности. При прочих одинаковых условиях проведенных экспериментов можно констатировать, что введение в состав воздуха микродоз органических веществ с высокой смазочной способностью улучшает трибологическое состояние контактной зоны. На рис. 5 представлена трибограмма процесса трения по схеме диск-диск стали 45 по стали 45, закаленной до твердости 57 единиц по HRC. Как следует из рисунка, введение в состав воздушного потока масла И-20А в количестве 0,5 г/час эффективно уменьшает момент трения (зона "б") по сравнению с трением всухую (зона "а") до величины, соизмеримой с аналогичным показателем для 100 %-ного масла И-20А. Предварительная ионизация воздушно-масляного потока (зона "в") приводит к дальнейшему уменьшению момента трения

и одновременно улучшает динамику процессов контактного взаимодействия, стабилизируя его.

Изучение влияния основных компонентов воздуха (кислорода и азота), а также их количества на параметры процесса резания при строгании проводилось на авторской установке, размещенной под вакуумным колпаком вакуумного поста ВУП-4 (рис. 6). Вращение от электродвигателя 1 через понижающий редуктор 2 передается на приводной вал 11, который представляет собой винт с гайкой. При вращении вал приводит в поступательное движение гайку с закрепленной на ней горизонтальной направляющей 8. На этой направляющей закреплена пластина с вертикальной направляющей 5, на которой при помощи зажимов 6 установлен резец 7, вертикальное перемещение которого регулируется микрометрическим винтом 4. Исследуемый образец 10 крепится неподвижно на плите основания 3 зажимами 9.

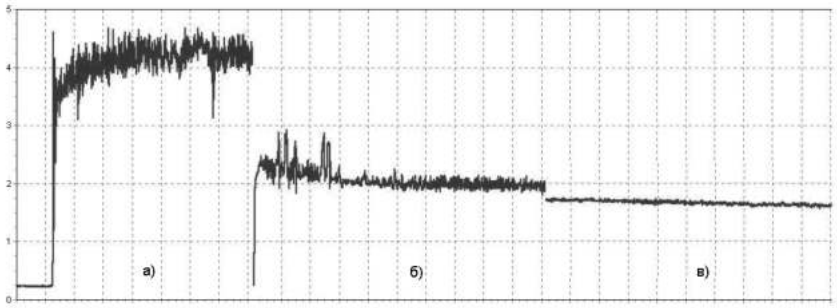
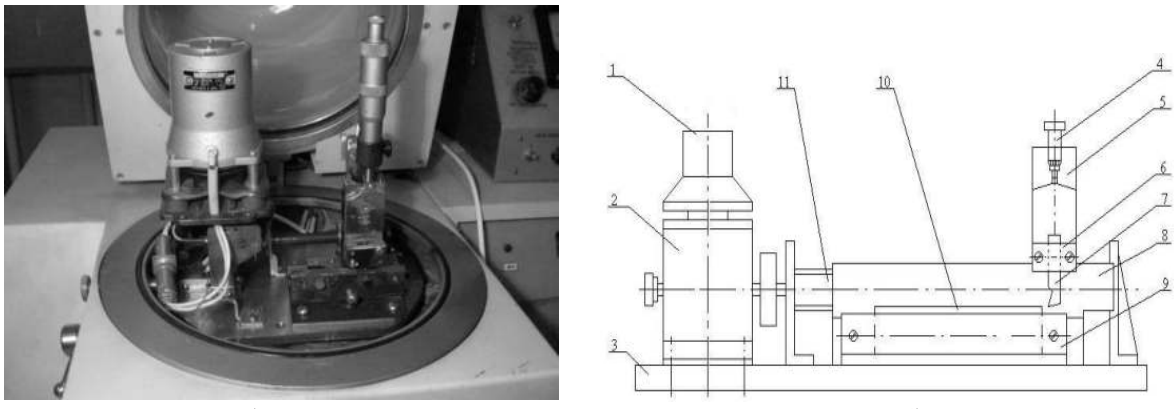


Рис. 5. Трибограмма момента трения стали 45 по стали 45, закаленной при нагрузках: *а)* 2,6 МПа, *б), в)* 3,6 Мпа V = 0,5 м/с

В ходе исследований изучалось влияние воздуха, а также азота и кислорода в отдельности на процессы формирования разделительных пленок при различных давлениях (от нормального до 10^{-5} мм.рт.ст.) по величине сил резания, корням стружки, развитию и изменению микротвердости зон пластической деформации.

В качестве исследуемых материалов использовались сталь 45, аустенитная нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, титановый сплав ВТ1-0. Образцы представляли собой пластины толщиной 0,8 мм. Резание осуществлялось резцами из быстрорежущей стали Р6М5 при скорости резания V = 2 мм/с и глубине резания t = 0, 05 мм.



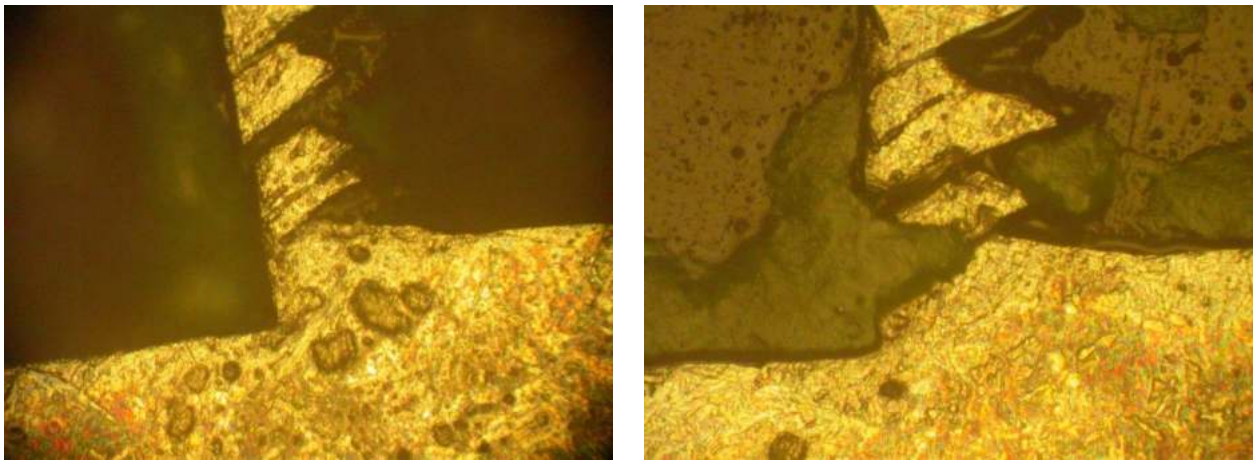
а) *б)*

Рис. 6. Внешний вид *(а)* и схема установки *(б)* для резания в контролируемой атмосфере.

В ходе исследований было установлено, что изменение вида газообразного СОТС и его количества оказывает заметное влияние на процессы стружкоотделения и характеристики процесса резания.

На рис. 7 представлены снимки корней стружек, полученные методом падающего резца при точении титанового сплава ВТ1-0. Из фотографий следует, что уменьшение давления в

вакуумной камере, а, следовательно, количества потенциального смазочного материала (в данных случаях воздуха) существенным образом приводит к увеличению коэффициента утолщения стружки ξ и уменьшению условного угла сдвига β.



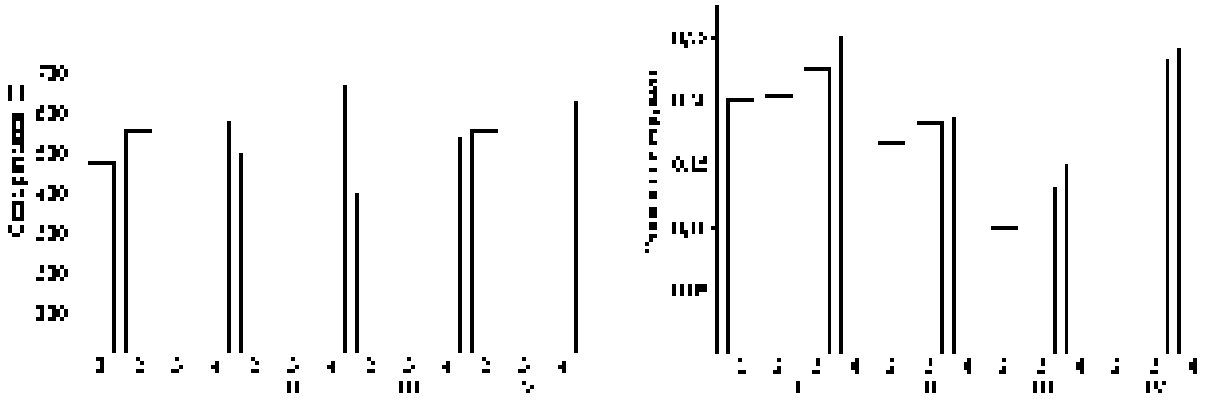
а) *б)*

Рис. 7. Фотографии корней стружек, полученные при свободном точении в вакуумной камере сплава ВТ1-0 резцом из стали Р6М5 при использовании в качестве СОТС воздуха: *а)* при нормальном давлении; *б)* при давлении 10^{-5} мм.рт.ст. V = 2 мм/с, t = 0,1 мм

Теория радикально-цепных реакций [1], описывающая процессы образования разделительных смазочных пленок на трибосопряженных поверхностях, при использовании в качестве СОТС воздуха основывается на физико-химических явлениях с участием кислорода и его олигомеров. Более поздними исследованиями, проведенными авторами настоящей работы, установлено, что в данном случае при описании физико-химических процессов в контактной зоне следует учитывать тот факт, что количество азота более, чем в 3 раза превышает концентрацию кислорода [10]. При изучении поведения азота в составе воздуха, используемого в качестве внешней технологической среды, определено, что количества энергии, выделяющейся в контактной зоне при разрушении металла в процессе резания, вполне достаточно для перевода молекулы азота в возбужденное состояние и последующего ее распада. Поэтому совокупное влияние воздуха на кинетику контактного взаимодействия представляет собой более сложный процесс, в котором принимает участие не только кислород, но и азот.

Настоящими исследованиями установлено, что применение (по отдельности) и кислорода, и азота в качестве СОТС оказывает заметное влияние на процессы стружкоотделения (рис. 8).

Детальный анализ представленных результатов показал, что в рассматриваемом случае чистый кислород имел более худшие показатели по силам резания по сравнению с азотом и воздухом при нормальном давлении. По нашему мнению, это обусловлено недостатком образующихся оксидных пленок, в результате чего адгезионные взаимодействия между рабочими поверхностями инструмента и обрабатываемым материалом остаются высокими. Это подтверждает ранее полученные данные по изучению смазочной способности озонсодержащих микрокапсул [11]. Исследованиями было установлено, что для эффективного улучшения характеристик процесса резания (условного угла сдвига, величины относительного сдвига, усадки стружки, коэффициента трения) и стойкости режущих инструментов необходимо дополнительное введение в состав СОТС олигомера кислорода – озона в состав микрокапсул. При этом определено, что количество дополнительно вводимых микрокапсул зависит от марки обрабатываемого материала. Так, при точении сталей 40Х и 12Х18Н10Т эффективная концентрация озонсодержащих микрокапсул в составе применяемой СОТС (дистиллированной воды) составила 4 масс.%, для сплава ВТ5-1 – 2 масс.%, ВТ6 – 1 масс.%.



а) *б)*

Рис. 8. Результаты исследований сил резания (а) и утолщения стружки (б) при свободном точении в вакуумной камере стали 45 при использовании в качестве СОТС воздуха (I), кислорода (II), азота (III), гелия (IV) при давлении: *1* – нормальном, *2* – 10^{-1} мм.рт.ст., *3* – 10^{-2} мм.рт.ст., *4* – 10^{-4} мм.рт.ст. V = 2 мм/с, t = 0,1 мм

В случае использования в качестве СОТС азота (рис. 8) отмечены минимальные значения сил резания и коэффициента утолщения стружки. Объяснением этого может служить изменение матричной структуры поверхности обрабатываемого материала в результате внедрения в нее атомов азота с образованием новых соединений. В процессе стружкоотделения свежевскрытые металлические поверхности испускают электроны, концентрация которых в отсутствии пассивирующих оксидных пленок достаточно высока [13]. Энергии этих электронов достаточно для того, чтобы перевести молекулы азота в возбужденное состояние и преобразовать часть из них в атомы и радикалы. Немаловажную роль в этом процессе играет и химическая активность образующихся ювенильных металлических поверхностей. Результатом подобных физико-химических превращений является образование в контактной зоне нитридных соединений типа $Fe_{2\text{-}3}N$ *(ξ- и ε-фазы)* с решетками ортогонального и гексагонального типа. Это установлено электронной микроскопией методом реплик, извлеченных с прирезцовой стороны стружки. Экспериментами не выявлено наличия кубической *γ'-фазы* (Fe_4N). По-видимому, это связано с достаточно узкой областью гомогенности данной фазы в системе *Fe-N*, либо с очень малым ее количеством. Одновременно с этим электронограммами зафиксированы новые фазы на передней поверхности резца, расшифровка которых показала присутствие отдельных включений нитридных соединений типа Fe_nN_m, в своем большинстве также имеющих решетку гексагонального структурного типа.

Согласно [12] для пары одноименных металлов с простой кубической решеткой сила трения возрастает. При трении металлов с разным строением кристаллической решетки или металлов, имеющих гексагональную кристаллическую структуру, сила трения снижается. Следовательно, вновь образованные нитридные фазы должны способствовать улучшению трибологической обстановки контактной зоны, что и зафиксировано в проведенных исследованиях. С другой стороны, образование нитридных фаз неизбежно приведет к повышению поверхностной твердости, а это, в свою очередь, изменит процесс стружкоотделения, переводя его в сторону резания более хрупких материалов, для которых характерно уменьшение величины продольной усадки стружки, ее уширения и утолщения, что и представлено на рис. 8, б.

Применение ионизированного воздуха усиливает действие его компонентов как в результате интенсификации процессов образования смазочных пленок между трибосопряженными поверхностями, так и за счет модификации фазового состава металлических поверхностей контактной зоны.

Относительно невысокие силы резания (примерно на уровне воздуха), зафиксированные в случае использования гелия, по нашему мнению, обусловлены следующим. Малые размеры молекулы гелия (1,37 Å), например, по сравнению с молекулой азота (4,45 Å), позволяют ему достаточно свободно проникать в поверхность обрабатываемого материала. Искажения решетки матрицы и появление концентраторов напряжений, вызванные внедрением гелия, приводят к изменению физико-механических характеристик поверхностного слоя обрабатываемого материала и, в первую очередь, его твердости. Это облегчает процесс стружкоотделения аналогично применению в качестве СОТС азота.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что для эффективного воздействия на трибологическую обстановку контактной зоны при резании металлов требуемое количество внешних технологических средств может быть значительно сокращено. При применении в качестве СОТС воздуха, в том числе и активированного действием электрических разрядов, совокупный эффект представляет собой интегральный показатель эффективности его компонентов, входящих как в первую, так и во вторую и третью группы составляющих воздух элементов и веществ. При этом эффективность действия такой СОТС при резании различных материалов можно регулировать варьированием количества этих составляющих компонентов.

Библиографический список

1. **Латышев, В.Н.** Повышение эффективности СОЖ / В.Н. Латышев // М.: Машиностроение, 1985. 65 с.

2. **Клушин, М.И.** Охлаждение и смазка распыленными жидкостями при резании металлов. / М.И. Клушин, В.М. Тихонов, Д.Н. Троицкая // Горький: Волго-Вятское книжное издательство. 1966. 123 с.

3. Развитие науки о резании металлов / Н.Н. Зорев [и др.] // М.: Машиностроение. 1967. 416 с.

4. **Латышев, В.Н.** Трибологические свойства соединений йода, предварительно сформированных в поверхности быстрорежущих инструментов / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов, В.С. Раднюк // Трение и износ. 2007. Т. 28. № 5. С. 441-448.

5. **Наумов, А.Г.** Улучшение экологии процессов лезвийной обработки металлов / Наумов, А.Г. // Станки и инструмент. 2002. № 7. С. 9-13.

6. **Латышев, В.Н.** Активация СОТС / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов // В кн. Смазочно-охлаждающие технологические средства // Справочник. Под общей ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение. 2006. 543 с.

7. Возможности и условия применения метода СЭО при резании металлов. / И.Д. Ахмедзянов [и др.] // Приборы и системы управления. №5. 1991. С.40-41

8. **Бедункевич, В.В.** Повышение эффективности применения режущих инструментов из сверхтвердых материалов и металлокерамики на основе метода сухого электростатичекого охлаждения. Изв. вузов Машиностроение, №7, 2003, с. 41-47.

9. **Некрасов, Б.В.** Основы общей химии / Б.В. Некрасов // М.: Химия. 1973. Т.1. 656 с.

10. Особенности формирования вторичных структур на трибосопряженных металлических поверхностях с участием ионизированного воздуха / В.Н. Латышев [и др.] // Металлообработка. 2007. № 1. С. 9-12.

11. Экологически чистые смазочно-охлаждающие технологические средства / В.Н. Латышев [и др.] // Вестник машиностроения. 1999. № 7. С. 32-35.

12. **Верещака, А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака // М.: Машиностроение. 1993. 336 с.

13. **Рабинович, Э.И.** Экзоэлектроны / Э.И. Рабинович // Успехи физических наук. 1979. Т. 27. Вып. 1. С. 163-174.

УДК 621.9 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_220

А.Г. Наумов, д-р техн. наук, **В.А. Комельков,** канд. техн. наук, **М.А. Колбашов,** канд. техн. наук (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС РФ)

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МИКРОКАПСУЛ В КАЧЕСТВЕ СОТС ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. *Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по возможности применения в качестве СОТС магнитных микрокапсул.*

This article states the results by experiment and theory regarding the possibility of application of the magnetic microcapsules as a cutting fluid.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие технологические средства, резание материалов, микрокапсулы.
Key words: cutting fluid, cutting of metal, microcapsules.

Микрокапсулы (МК), как носители веществ, достаточно широко используются в мировой практике в таких отраслях как химическая промышленность, медицина, сельское хозяйство.

В машиностроении основной областью использования МК являются операции обработки давлением [1]. О применении МК при резании сведения весьма ограниченные. Выявлено лишь два случая использования МК на операциях стружкоотделения [2, 3].

Причины, ограничивающие применение МК на операциях резания, по-видимому, обусловлены физико-механическими характеристиками их оболочек и поведением МК в СОТС в процессе резания. Так, невысокие температуры деструкции практикуемых желатиновых оболочек МК (75-80^{O}C) не позволяют им приближаться к зоне контакта на расстояния, которые необходимы для эффективного действия их ядра. С другой стороны, МК, находящиеся в жидком носителе, не имеют какого-либо явно выраженного направления перемещения, а подчиняются хаотичному броуновскому движению. Это приводит к вероятностному характеру попадания МК в зону контакта. Совокупность этих причин нивелирует эффективность применения МК при резании и, для получения положительных результатов, требует значительного увеличения количества МК, что делает такую СОТС нерентабельной.

В настоящей работе представлены результаты исследований по применению микрокапсулированных СОТС (МК СОТС) на операциях лезвийного резания, т.е. при подаче микродоз СОТС, каждая из которых окружена оболочкой из непроницаемого для него материала. Размеры МК варьировались в пределах от сотен нанометров до 30-50 мкм. Для повышения эффективности их действия в состав МК были дополнительно введены магниточувствительные компоненты, в качестве которых использовался магнетит Fe_3O_4 с размерами частиц порядка 10 нм - магнитные микрокапсулы (ММК).

Концепция направленного движения ММК, имеющих в своем составе магнетит Fe_3O_4, основана на положении классической физики о том, что ферромагнитная частица при воздействии на нее магнитным полем ориентируется по полю и может иметь движение вдоль силовых линий этого поля.

Процессы, протекающие в зоне контакта (стружкоотделение, наличие СОТС, физические свойства материалов и др.) приводят к изменению силы тока. Эти колебания вызывают изменение во времени напряженности электрического поля, порожденного электрическим током, т.е. в зоне контакта существует переменное электрическое поле. Одновременно с этим в зоне резания постоянно присутствуют заряженные частицы (ионы, экзоэлектроны, химические радикалы и др.). Наличие переменных электрических полей и заряженных частиц, согласно теории Максвелла, приводит к возбуждению магнитных полей, индукция которых может

изменяться в широких пределах. Как следует из [4], действующая магнитная сила всегда направлена в области пространственной неоднородности магнитного поля, где максимально сконцентрирован выход магнитных силовых линий. Применительно к режущему инструменту такие области располагаются у вершины инструмента и на его режущих кромках.

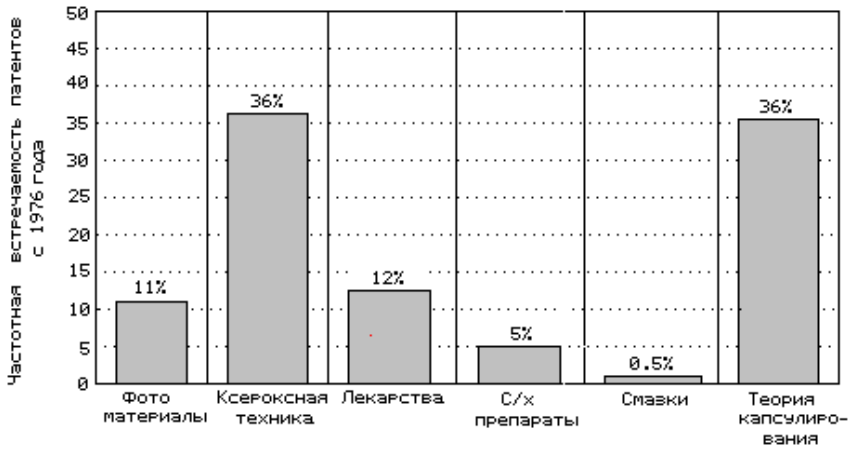


Рис. 1. Анализ патентной информации по применению микрокапсул в отраслях мировой промышленности с глубиной поиска 25 лет

Рядом работ установлено, что сила тока при резании колеблется в пределах от 4,5-5,0 А [5, 6] до 10 А [7]. При подаче МК СОТС в жидком носителе на расстоянии порядка 3 мм от вершины резца магнитная индукция составит В = 0,2 мТл. С учетом относительной магнитной проницаемости материала режущего инструмента (μ = 200-5000), величина магнитной индукции может возрасти до значений 40-1000 мТл.

Поступление МК в зону контакта будет наблюдаться лишь в том случае, если сила поля F_m, действующая на МК, превышает силу тяжести F_g. При массе капсулы $m \sim 3\ 10^{-12}$ кг и приведенных выше величинах магнитной индукции имеем:

$$F_m / F_g = F_m / mg \approx 49 - 126 \qquad (1)$$

Таким образом, теория показывает, что сила, действующая со стороны поля на ММК, превышает в 49 - 126 раз силу тяжести, т.е. ММК будет двигаться в сторону зоны контакта под влиянием естественных электромагнитных полей.

Измерение магнитной составляющей электромагнитного поля, возникающего в процессе лезвийной обработки, производилось при точении. Регистрирующим элементом установки служила рамка с намотанным на нее проводом, которая использовалась как маятник, пересекающий магнитные силовые линии поля.

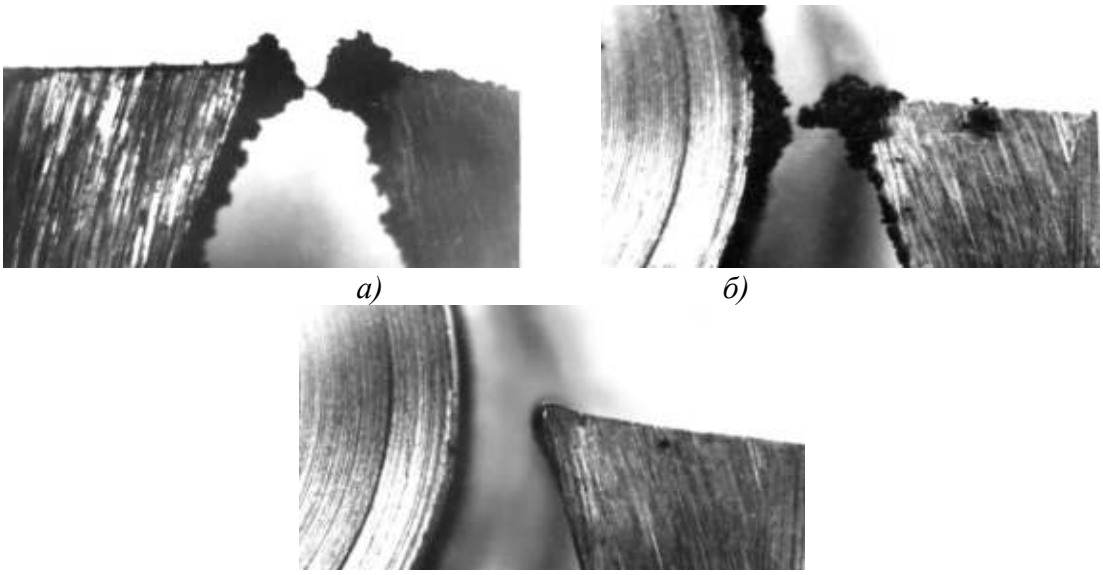
При проведении экспериментов период колебаний рамки составлял $\nu = 1$ с$^{-1}$, ее площадь $S = 4{,}04 \cdot 10^{-4}$ м^2, число витков $N = 20$. Исследования проводились после точения титанового сплава ВТ6 резцами из быстрорежущей стали Р6М5 при следующих режимах: V = 0,15-0,50 м/с, S = 0,10 мм/об, t = 0,5 мм. При этом было установлено, что различные положения плоскости качения рамки приводили к результатам значительно отличающимися друг от друга. Такое распределение величин ЭДС индукции указывало на резкую неоднородность магнитного поля в прирезцовой области, что вызвано, по-видимому, сложной геометрией поля.

Изучение влияния скорости резания на величину магнитной индукции показало, что с увеличением скорости резания величина B возрастает нелинейно. Максимальные значения магнитной индукции отмечены при повышенных скоростях. Расчетами определено, что сила, действующая на ММК со средним размером 30 мкм в 20-40 раз больше силы тяжести, т.е. достаточна для придания ММК направленного движения.

Направление движения ММК изучалось в статике посредством специально наведенного магнитного поля между двумя резцами, изготовленными из стали Р6М5, а также между резцом

и обрабатываемым материалом (рис. 2). При этом установлено, что в обоих случаях ММК стремились именно к режущим кромкам резцов и выстраивались по силовым линиям магнитного поля, протекающего по цепи "инструмент-инструмент" или “деталь-инструмент”. Для сравнения на рис.2, в представлена фотография поведения ферромагнитной жидкости при тех же условиях эксперимента.

Изучение направления движения ММК в реальных условиях резания проводилось по внешнему виду рабочих поверхностей резцов после точения сплава. ВТ6. Установлено, что при использовании 1%-ной суспензии ММК рабочие поверхности резца были покрыты слоем вещества, представляющего собой полимер оболочек ММК, подвергнутый термической деструкции. Его количество увеличивалось по мере приближения к режущим кромкам, как по передней, так и по задним поверхностям. Максимум фиксировался вблизи вершины инструмента. Использование 4%-ной суспензии немагнитных МК (без магнетита) при аналогичных условиях резания приводило к появлению темных фрагментов только по передней поверхности, причем их распределение носит вероятностный характер.



а) *б)*

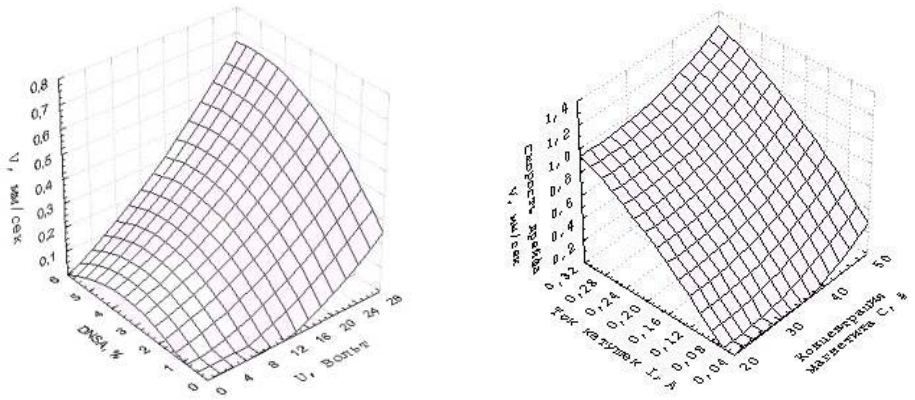
в)

Рис. 2. Направление движения ММК в условиях наведенного магнитного поля при B/r = 3,4 кТл/м: *а)* между двумя резцами из стали Р6М5;
б) между резцом и поверхностью сплава ВТ6
в) ферромагнитной жидкости на режущем клине резца Р6М5

Определение скорости дрейфа микрокапсул производилось с помощью ячейки Керра. Для придания ММК движения в электрических полях в состав жидкого носителя дополнительно вводилось поверхностно-активное вещество ДНСА. в концентрации, не превышающей критической концентрации мицеллообразования. В этом случае на контакты ячейки подавалось напряжение в пределах от 0 до 26 В. При использования постоянного магнитного поля, напряженность которого изменялась от 0 до 7545 А/м, его возбуждение осуществлялось посредством электромагнита.

Исследованиями установлено, что в электрическом поле скорость дрейфа ММК не превышала 0,67 мм/с (рис. 3, а). При этом отмечено, что с увеличением концентрации ПАВ скорость перемещения МК может не только возрастать, но и несколько снижаться.

При управлении движением ММК магнитным полем, концентрация магнетита в их составе и управляющий ток в катушках в равной степени влияли на скорость перемещения ММК. В этом случае максимальная скорость ММК более чем в 2 раза превысила предыдущее значение и зафиксирована на уровне 1,25-1,35 мм/с, причем движение МК наблюдалось уже при низких значения токов (рис. 3.б).



а) б)

Рис. 3. Скорость движения ММК в электрическом (а) и магнитном (б) полях

Реальные процессы резания металлов сопровождаются значительными величинами температур и давлений в зоне контактирования, с одной стороны, а с другой - теория резания металлов не исключает существования областей пониженного давления. Кроме того, в обоих процессах постоянно присутствует взаимное перемещение контактирующих поверхностей. В связи с этим в настоящих исследованиях были обоснованы четыре основных механизма вскрытия МК: механический (разрушение оболочки вследствие механического воздействия); термический (тепловое разрушение оболочек); гетеробарический (разрушение оболочек при изменении внешнего давления); диффузионный (истечение внутренней фазы через поры оболочек).

При изучении температур термического разрушения оболочек МК исследованиям были подвергнуты два вида МК: магнитные и немагнитные, заполненные индустриальным маслом *И-40А* и четыреххлористым углеродом CCl_4. Количество МК, претерпевших термическое разрушение, определялось подсчетом видимых в микроскоп поврежденных или оплавившихся МК. Для сравнения, аналогичные исследования были проведены с МК, использованных в качестве носителя CCl_4 авторами работы [8].

Исследованиями установлено, что состав внутренней фазы МК не оказывает влияния на значения теплостойкости их оболочек. Наличие в оболочке ММК магнетита так же не приводило к изменению температур вскрытия, максимальные значения которых зафиксированы в области 200-225^{O}C (рис. 4). Полученные значения более чем в 2 раза превысили температуры термодеструкции эталонных МК. Одинаковые условия при изготовлении МК и при проведении исследований позволили сделать вывод о том, что зафиксированные в экспериментах высокие температуры вскрытия МК обусловлены выбором дубящего вещества на стадии сшивки оболочки МК при их изготовлении.

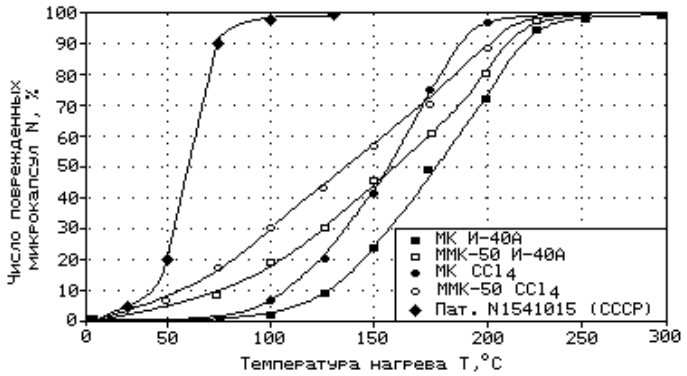


Рис. 4. Зависимость числа вскрытых МК от температуры их нагрева

Имея невысокую теплопроводность полимерного материала оболочки, толщина которой порядка 3 мкм, и наличие направленного движения с некоторой скоростью, МК способны

находиться некоторое время в областях, температура в которых значительно превосходит показанную выше температуру их термического разрушения. Проведенные расчеты показали, что изменение времени возможного пребывания МК при повышенных температурах подчиняется параболическому закону. Принимая во внимание величину средних температур, возникающих при резании быстрорежущим инструментом (порядка 600^{O}C), время существования ММК при этих температурах (0,4-0,5 с) и наличие у ММК направленного движения можно утверждать, что ММК за время своего пребывания в зоне резания, при существующей технологии их подачи, имеют возможность без разрушения приближаться непосредственно к режущим кромкам или вершине инструмента. Это экспериментально подтверждено данными, представленными на рис. 4.

Изучение поведения МК в условиях изменяющегося внешнего давления проводилось в два этапа: при повышенном внешнем давлении и при уменьшении внешнего давления.

При избыточном внешнем давлении исследования проводились в условиях изотермического одноосного сжатия.

При уменьшении внешнего давления одновременно оценивалось действие двух механизмов декапсулирования (рис.5). В результате проведенных исследований определены условия начала массового вскрытия МК, обусловленного прочностными характеристиками оболочек, и оценен вклад диффузионных процессов по высвобождению внутренней фазы. Установлено, что минимальное уменьшение массы капсул наблюдалось для ММК, содержащих индустриальное масло (кривые 1), а максимальное - для ММК с четыреххлористым углеродом (кривые 2).

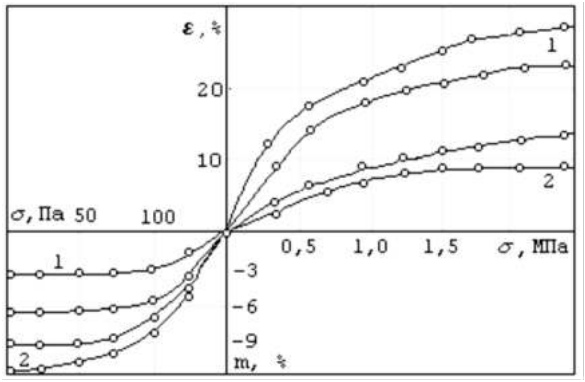


Рис. 5. Совмещенные результаты поведения МК при изменении внешнего давления

На основе проведенных исследований предложена схема, отображающая проявление различных механизмов вскрытия МК (рис. 6). На схеме области существования микрокапсул и возможных механизмов их декапсулирования представлены четкими границами. В реальных условиях таких границ не наблюдалось. Экспериментами определены расположенные вдоль линий *ABC* и *DBE* области вероятностного существования и вскрытия МК. В этих областях механизмы декапсулирования проявлялись, как правило, в сложной форме - разрушение в результате одновременного действия нескольких механизмов.

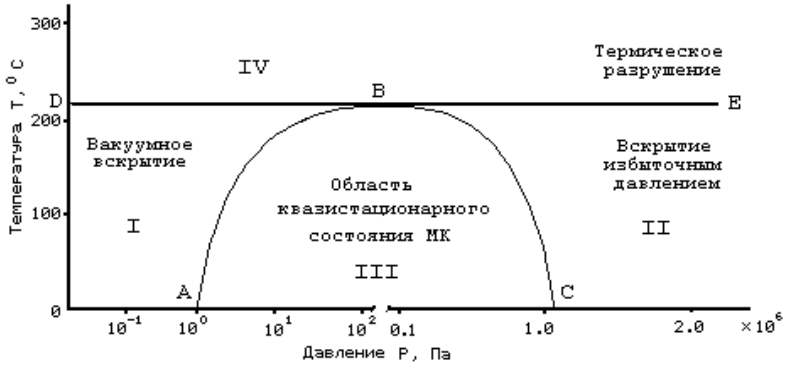


Рис. 6. Схема механизмов высвобождения внутренней фазы микрокапсул

Изучение характеристик процесса резания и стойкости инструментов в реальных условиях проводилось на операциях точения и сверления в лабораторных и производственных условиях. Микрокапсулы подавались в зону резания в виде суспензии в дистиллированной воде капельным методом.

Установлено, что применение МК СОТС с концентрацией ММК от 1,0 % до 4,0 % (рис.7) способствует эффективному повышению стойкости режущих инструментов не только по сравнению с резанием всухую, но и при использовании стандартных водоэмульсионных и масляных СОТС. Дальнейшее увеличение количества ММК практически не оказывало заметного влияния на повышение работоспособности инструментов.

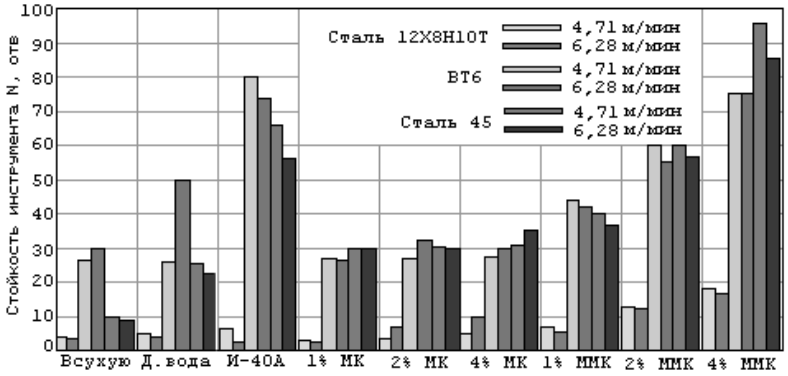


Рис.7. Гистограмма стойкости сверл из БС Р6М5 при сверлении всухую и с применением СОТС

Одним из основных параметров процесса резания является качество обработанных поверхностей, в частности, величина и знак остаточных напряжений. Исследованиями, проведенными в производственных условиях ММПП "Салют" [9] установлено, что применение ММК СОТС имеет показатели не хуже по сравнению с другими СОТС при высокой повторяемости результатов (рис.8).

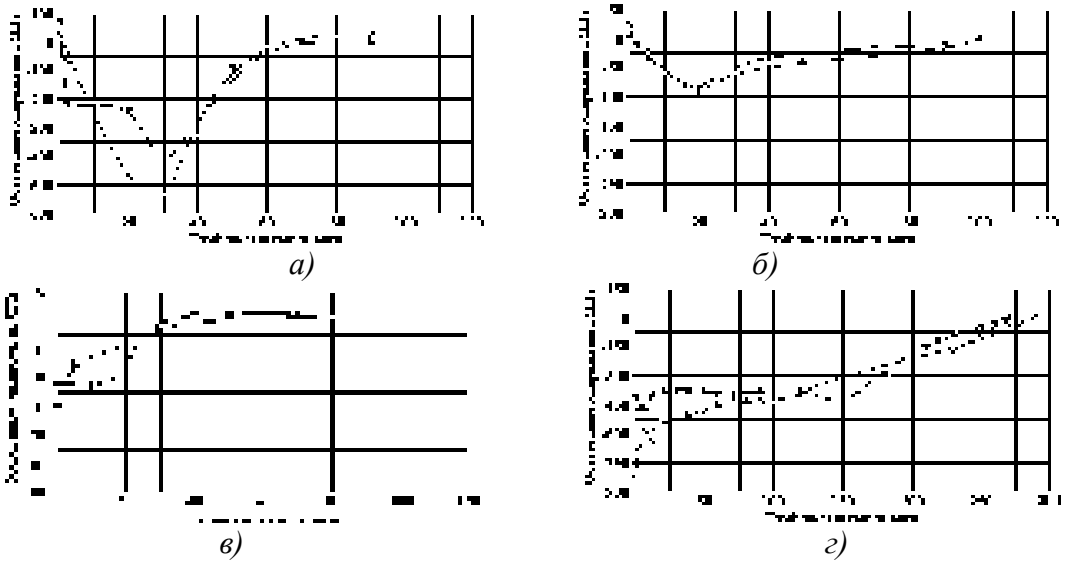


Рис. 8. Эпюры остаточных напряжений в образцах сплава ВТ9 после точения резцами ВК-6ОМ с использованием в качестве СОТС: *а)* сжатого воздуха; *б)* ММК СОТС; *в)* ионизированной воздушной среды; *г*) упрочняющей дробеструйной обработки шариками D = 3 мм

Заключение

Рассмотренный в данной работе вопрос о возможности подачи СОТС при резании металлов в виде магнитных микрокапсул и их влияния на процессы контактного

взаимодействия относится к одному из направлений, сложившихся в мировой практике и направленных на снижение техногенных рисков и улучшение экологии металлообработки. Конструирование новых составов экологически чистых или экологически безвредных СОТС, техника их применения представляют собой многогранную задачу, решение которой должно базироваться на всестороннем и глубоком изучении физико-химических процессов, протекающих в контактной зоне между инструментальным и обрабатываемым материалами.

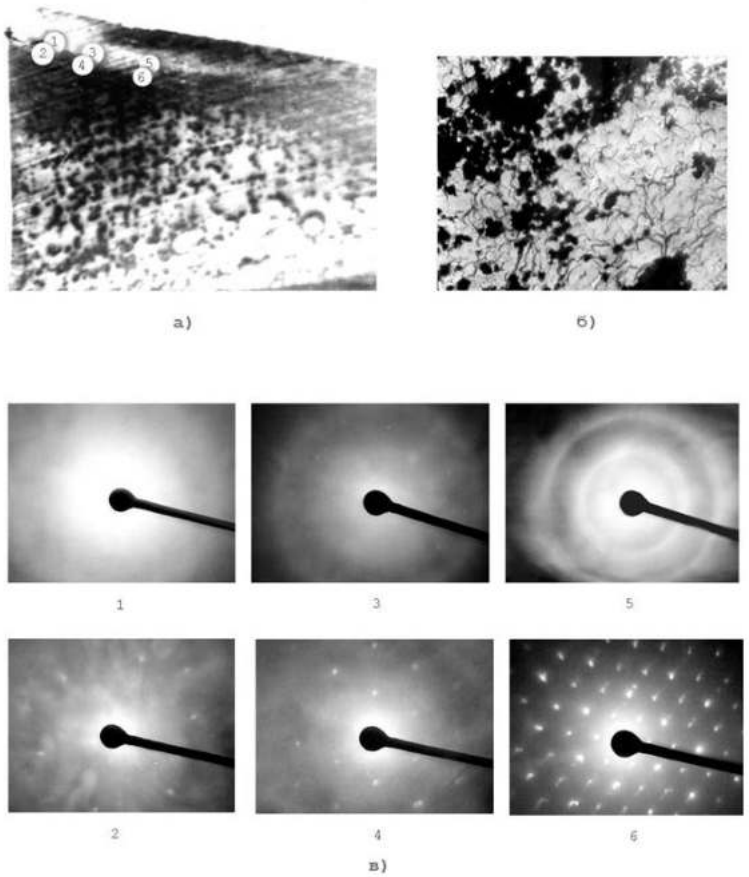


Рис. 9. Результаты исследований вторичных структур методом тонких фольг, сформированных на передней поверхности резца при точении Ст.3 при использовании ММК-50: *а)* области исследования на передней поверхности резца, х10; *б)* то же, х8600; *в)* электронограммы вторичных структур V = 0,48 м/с, S = 0,1 мм/об, t = 0,5 мм

В соответствии с этим, проведение исследований с целью выявления физико-химических закономерностей в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом и разработкой на этой основе новых СОТС и способов их применения, обеспечивающих выполнение требуемых как экологических, так и технологических характеристик, является актуальной научно-технической проблемой.

Библиографический список

1. Sertificate N 297596 (Japan). 1990.

2. **Девочкин, А.А.** Разработка составов и техники применения смазочно-охлаждающих композиций при обработке резанием молибдена и алюминия / А.А. Девочкин // Дис. ... к.т.н. Горький. 1988. 203 с.

3. **Whitnev, R.A.** Two component cutting/cooling fluids for high speed machining / R.A. Whitnev, V.S. Colvin, J.C. Mulligan / МКИ F 01 M 5/00.

4. **Кухлинг, Х.** Справочник по физике / Х. Кухлинг // Пер. с нем. М.: Мир. 1982. 520 с.

5. **Якунин, Г.И.** О воспроизводимости эффектов влияния термотоков и намагниченности резцов на стойкость инструмента при соответственных температурно-скоростных условиях резания / Г.И. Якунин, Э.А. Умаров, А.А. Анцупов // В сб. "Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел". М.: Наука. 1973. С. 132-137.

6. **Опитц, Г.** Об износе режущего инструмента / Г. Опитц // В сб. "Новые работы по трению и смазке". М.: 1959.

7 **Постников, С.Н.** Исследование электрических явлений при трении и резании металлов / С.Н. Постников // Автореферат дис. к.т.н. М.: ИМАШ. 1968.

8. Микрокапсулирование как метод введения трибоактивных присадок в смазочные материалы при резании / А.А. Девочкин [и др.] // Тезисы докл. Всесоюзного научно-техн. семинара "Опыт применения новых смазочно-охлаждающих сред при обработке металлов резанием". Горький. 1987. С. 156-159.

9. Влияние условий экологически безопасного резания с охлаждением ионизированной газовой средой на качество поверхностного слоя и долговечность деталей / В.А. Поклад [и др.] // В сб. трудов научно-технического симпозиума “Двигатели и экология”. М.: 2002.

УДК 620.178.162 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_227

А.С. Парфенов, Е.В. Березина, д-р техн. наук, **Н.С. Скобелева, А.В. Волков,** канд. техн. наук (Ивановская государственная медицинская академия» Министерства здравоохранения Российской Федерации), **В.А. Годлевский,** д-р техн. наук, (Ивановский государственный университет)

МЕХАНИЗМ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА В ПРИСУТСТВИИ НАНОРАЗМЕРНОЙ ПРИСАДКИ

Аннотация. *Проведены трибологические испытания совместного действия абразивных частиц и наноразмерной углеродной присадки. Предложена модель массопереноса присадки на твердых частицах.*

Tribological tests of combined action of abrasive particles and nanosized carbon additive are performed. The model of additive mass transfer on solid particles has been proposed.

Ключевые слова: абразивный износ, присадка, углеродные нанотрубки
Keywords: abrasive wear, additive, carbon nanotubes

Для транспортной, сельскохозяйственной, дорожной, строительной и других распространенных видов техники особенно актуальна проблема абразивного изнашивания узлов трения. Способами повышения надежности сопряжений может быть использование уплотнительных устройств, систем фильтрации, упрочнение поверхности деталей трения. При этом метод применения в узлах трения, работающих в условиях высокой запыленности, смазочных материалов, модифицированных присадками и наполнителями, остается актуальным. В связи с тем, что полностью герметизировать подвижную систему невозможно, в области контакта будут накапливаться как абразивные частицы, так и частицы износа.

В общем случае трибосистема, работающая в условиях абразивного изнашивания, имеет следующий состав.

- Смазочный материал (жидкий или пластичный)
- Ряд трибоактивных присадок
- Абразивные частицы
- Частицы износа поверхностей трения

В качестве присадок для смазочных материалов в последние годы активно используются наноразмерные компоненты: нанопорошки металлов [1-2], углеродные

наночастицы: графен, шунгит, углеродные нанотрубки [3-4]. Углеродные нанотрубки (УНТ), обладая высокой прочностью и несущей способностью должны обладать хорошими трибоактивными свойствами, но достаточно инертны и не концентрируются на поверхностях трения. Повысить эффективность работы присадки можно, если использовать способы доставки наночастиц непосредственно в зону трения.

В процессе эксплуатации пары трения, особенно в условиях высоких нагрузок и температур, происходит комплексная деградация трибосистемы: увеличение концентрации твердых компонентов (загрязнителей), деструкция присадки. В этом случае, следует обратить внимание на массоперенос присадки между всеми твердыми поверхностями.

Предполагая, что абразивные частицы, как внешней природы (твердые загрязнения смазочного материала), так и появившиеся в процессе трения (частицы износа поверхностей), выступают в роли транспорта присадки, можно предположить, что повышение концентрации присадки приводит к тому, что большее количество абразивных частиц в объеме адсорбируют на себя материалы присадки, что снижает износ поверхности.

Эксперимент показывает, что трибологическая активность присадки начинает работать уже при низких значениях ее концентрации, поэтому исследование интенсивности износа вблизи низких концентраций наноприсадки позволяет делать предварительные оценки ее трибоактивности в объеме вещества. Чтобы количественно описать эту характеристику можно ввести параметр активности, как отношение разности интенсивности износа в отсутствии присадки и в присутствии малой концентрации к значению этой концентрации.

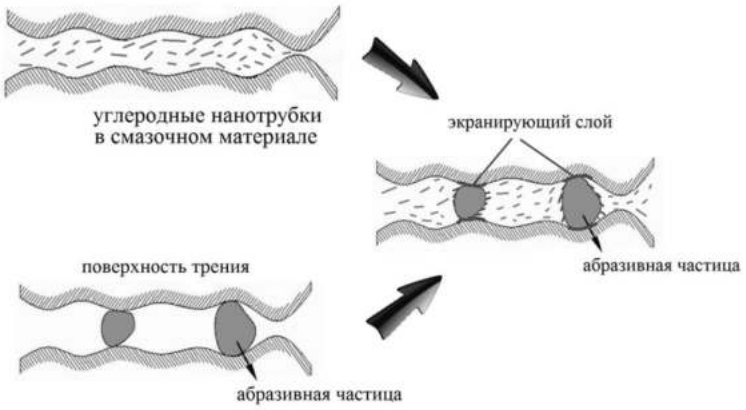


Рис. 1. Модель адсорбции наноприсадки на твердом абразивном материале

Активность присадки в этом случае можно сопоставить с ее градиентом к поверхностям трения (контакта) из объема. Если динамику износа сопоставить с динамикой адсорбции присадки в местах абразивного контакта, то в условиях стационарного процесса износа приток присадки к поверхностям контакта можно выразить скоростью адсорбции.

Можно ожидать, что твердые компоненты, взвешенные в СМ, будут являться своеобразным микротранспортом, обеспечивающим перенос присадки из объема на поверхности трения.

В качестве смазочного материала использовали масло И-40А (ГОСТ 20799-88), медицинский вазелин (ГОСТ 3164-78). Основные характеристики смазочных материалов приведены в таблице 1.

Характеристики абразивного материала Электрокорунд 25А 0,063-0,125 (F180) и присадки для смазочного материала Таунит-М (производства ООО «НаноТехЦентр г. Тамбов) приведены в таблице 2.

Следует отметить, что важную роль должны играть твердость абразивных частиц, характер их распределения по размерам, форма частиц. В данном исследовании выбраны частицы корунда остроугольной формы (рис. 2). Высокая микротвердость позволяет снизить влияние измельчения абразива, изменения его формы и размеров.

Таблица 1

Характеристики смазочных материалов

Вазелиновое масло		Индустриальное масло И40А	
Плотность при 20 °С, кг/м3, не менее	870	Плотность при 20 °С, кг/м3	900
Зольность, % не более	0,005	Зольность, % не более	0,005
Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С не ниже	185	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С не ниже	220 °С
Температура застывания, °С	-8	Температура застывания, °С	– 15 °С
Содержание воды, парафина, сернистых соединений, восстанавливающих веществ	Отсутст-вие	Содержание воды	Следы

Таблица 2

Характеристики абразивного материала и присадки

Абразивный материал Электрокорунд 25А		Наноразмерная присадка Таунит-М	
Фракционный состав, мм	0,063-0,125	Внешний диаметр, нм	10-30
Основной размер фракции, мм	0,075-0,090	Внутренний диаметр, нм	5-15
Плотность, г/см³	3,9 - 3,95	Длина, мкм	≥2
Микротвёрдость, ГПа	19,6-20,9	Удельная поверхность, $м^2/г$	≥270

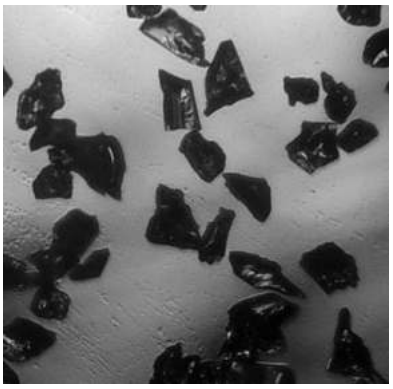


Рис.2. Характерная форма частиц абразивного материала Электрокорунд 25А

Изучение реологических характеристик систем смазочный материал – присадка, позволяет расширить возможность регулирования трибологических свойств композиций. Вязкость модифицированного смазочного материала не должна серьезно изменяться, так как это может привести к изменению режима трения.

Реологические испытания проводились на ротационном вискозиметре Brookfield DV-2. Скорость вращения шпинделя 100 RPM, температура поддерживалась равной 25 °С.

Испытания показали увеличение вязкости суспензии СМ + УНТ на величину до 9%, как в случае с вазелиновым маслом, так и в индустриальном масле И40. При этом в диапазоне концентраций до 0,5 мас. % происходит резкое возрастание кинематической вязкости, как в ВМ, так и в И40. Дальнейшее увеличение концентрации присадки УНТ до 2,5 мас. % приводит к плавному повышению вязкости, на величину, не превышающую 3%. (рис. 3).

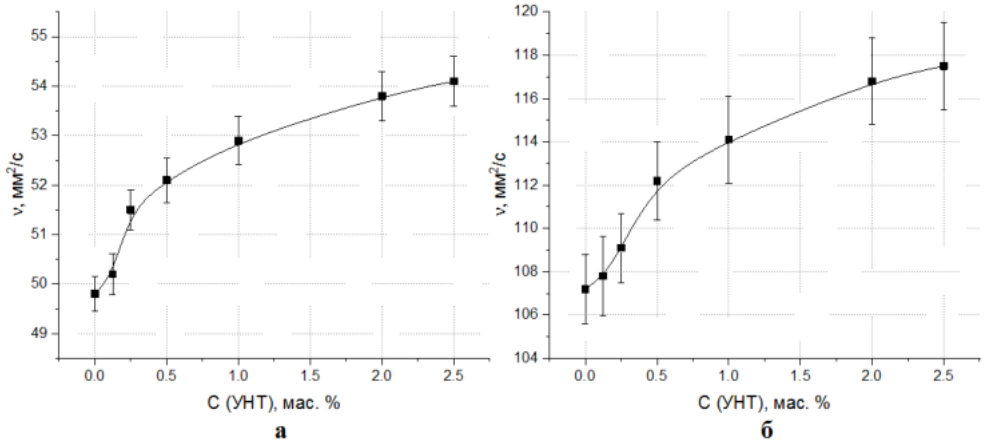


Рис. 3. Кинематическая вязкость суспензий СМ + УНТ в ситуации с вазелиновым маслом *(а)* и индустриальным маслом *(б)*

Триботехнические испытания проводились на стандартной машине трения 2070 СМТ-1, по схеме ролик-ролик (рис. 4). Материал пар трения: закаленная сталь 40Х (твердость 45 HRC). Условия трения: частота вращения шпинделя - 300 об/мин, нагрузка 1000 Н.

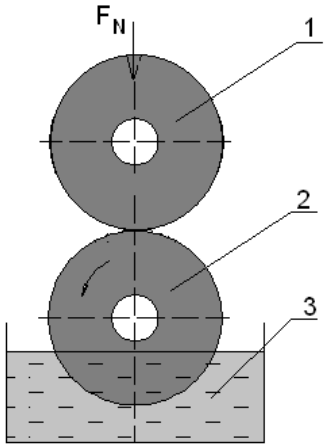


Рис. 4. Схема испытаний ролик-ролик на машине трения 2070 СМТ-1.
1 – неподвижный ролик, *2* вращающийся ролик, *3* – ванна со смазочным материалом.

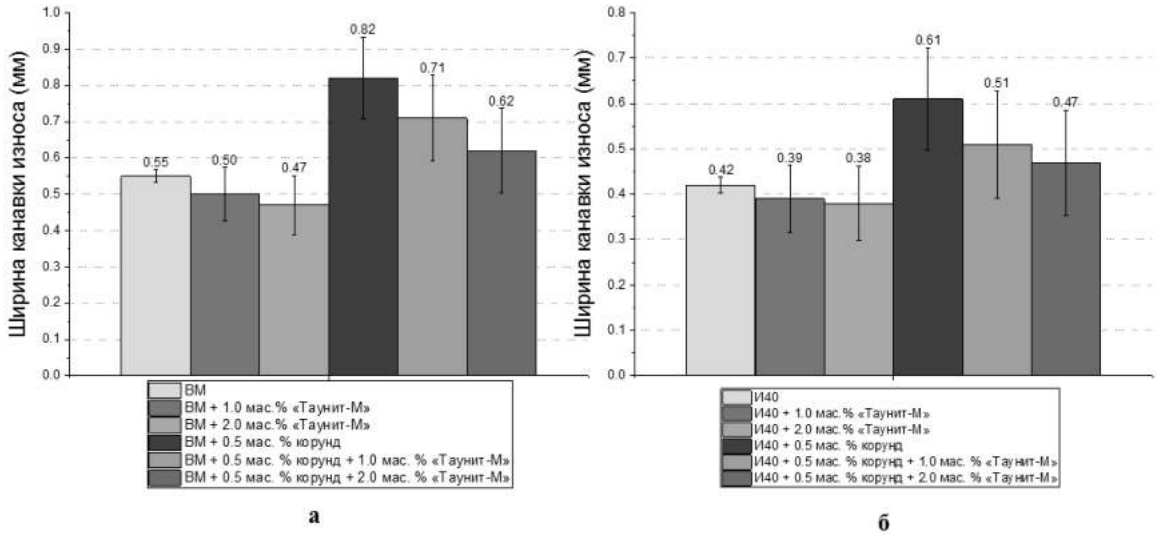


Рис. 5. Ширина канавки износа ролика при испытаниях на трение в ситуации с вазелиновым маслом *(а)* и индустриальным маслом *(б)*

Испытания показали, что добавление 0.5 мас. % абразивного материала приводит к увеличению ширины канавки износа как в вазелиновом масле (ВМ), так и в И40: рост составил порядка 49% для композиции ВМ-УНТ и 45% для композиции И40-УНТ (рис. 5). Введение в смазочный материал углеродных нанотрубок без загрязнителя приводит к уменьшению износа. При этом наблюдается концентрационная зависимость противоизносного действия. При введении в систему ВМ-УНТ 1 мас. % углеродных нанотрубок, износ снижается на 10%, при увеличении концентрации до 2 мас. % снижение износа происходит на 17%.

Совместное введение в смазочный материал углеродных нанотрубок и абразивного загрязнителя демонстрирует повышение эффективности антиизносного действия УНТ: при концентрации 1 мас. % ширина канавки снижается на 15% в ВМ и на 19% в И40 относительно смазочного материала с абразивом. Увеличение концентрации присадки до 2 мас. % приводит к снижению ширины канавки на 32% в ВМ и на 30% в И40.

Библиографический список

1. **Singh, A.** A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives / A. Singh, P. Chauhan, T.G. Mamatha // Materials Today: Proceedings. – 2020, №25, – С. 586–591.

2. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives / Gulzar M. [et al.] // Journal of Nanoparticle Research. – 2016. – № 18(8)

3. Study of the tribological behavior of different carbonaceous nanomaterials such as antiwear additives for an environmentally friendly lubricant / D.L. Cursaru. [et al.] // Dig. J. Nanomater. Biostructures. – 2013. – Т. 8. – № 2, – С. 805–815.

4. Tribological Properties of Plastic Lubricants in Compositions With Various Carbon Nanostructures / Parfenov A.S. [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2019, – Т. 40. – № 5, – С. 590-598.

УДК 665.765 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_231

М.А. Плахотникова, Н.Н. Лысянникова, канд. техн. наук (Сибирский федеральный университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ МАСЕЛ НА ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ

Аннотация. *Выполнено исследование авиационных масел различной базовой основы на термоокислительную стабильность.*

The study of aviation oils of various basic bases for thermal and oxidative stability was carried out.

Ключевые слова: термоокислительная стабильность, авиационное масло, оптическая плотность, вязкость, испаряемость.

Keywords: thermal-oxidative stability, aviation oil, optical density, evaporation.

Надежность и ресурс летательных аппаратов в значительной мере зависит от работоспособности его узлов трения и смазки: подшипников, зубчатых колес и контактных уплотнений. Наиболее тяжелые условия в масляной системе наблюдаются в камерах основных подшипников, где масло подвергается воздействию повышенной температуры и давления в окислительной и каталитической среде, что вызывает старение масел в процессе эксплуатации. Температура является наиболее весомым фактором, которая определяет интенсивность химических реакций, термоокислительную стабильность, температурную стойкость, ресурс присадок и базовой основы и вызывает изменение вязкости, кислотного и щелочного числа, накопление продуктов окисления. Поэтому термоокислительной

стабильности как показателю эксплуатационных свойств уделяется должное внимание, однако окислительные процессы представляют собой сложный механизм и недостаточно изучены.

В России и за рубежом существуют различные методы контроля термоокислительной стабильности авиационных масел.

Метод определения термоокислительной стабильности в объеме масла предусматривает оценку термоокислительной стабильности по количеству образовавшегося осадка, нерастворимого в изооктане, изменению вязкости, кислотного числа и наличию отложений в реакционном сосуде, а также коррозионности масла, по изменению массы пластинок-катализаторов [1].

Метод определения стабильности против окисления предусматривает термоокислительную стабильность определять на приборе ВТИ в присутствии кислорода и катализаторов при повышенной температуре. Стабильность масла характеризуется кислотным числом, количеством летучих низкомолекулярных кислот и осадка, образующихся при окислении [2].

Метод определения стабильности против окисления в универсальном приборе предусматривает определение ТОС по таким показателям, как кислотное число, число омыления, вязкость, содержание смол, коксуемость, содержание нерастворимого осадка, тангенс угла диэлектрических потерь, удельное электрическое объемное сопротивление, цвет и масса катализатора [3].

Метод определения термоокислительной стабильности и коррозионной активности при котором жидкости окисляются в контакте с металлами и воздухом при нагреве до плюс 200 °С или техническим азотом при нагреве до плюс 300 °С. Термоокислительную стабильность оценивают по изменению внешнего вида, кислотного числа и вязкости, а коррозионную активность – по изменению массы металлических пластин (катализаторов) [4].

Метод определения стабильности заключается в использовании аппарата Папок, в котором происходит нагревание тонкого слоя масла на металлической поверхности, испарении из него легколетучих веществ, образующихся при разложении, с последующим разделением остатка на рабочую фракцию и лак, и последующем определении термоокислительной стабильности [5].

Фотометрические методы оценки термоокислительной стабильности [6-10], включающие нагревание смазочного материала в присутствие воздуха, перемешивание, фотометрирование и определение параметров оценки процесса окисления. По результатам исследования выполняется построение графической зависимости показателя термоокислительной стабильности.

Зарубежные методы контроля термоокислительной стабильности авиационных масел:

- ASTM D4636 –коррозионная стойкость и устойчивость к окислению легких масел (металлические пластины);

- DEFSTAN 05-50 (часть 61), метод 9 –устойчивость к окислению и термическому разложению;

- FTMS 3411 –термическая стабильность и коррозионная стойкость смазочных материалов для авиационных турбинных;

Все эти методы различаются используемым оборудованием, рассматриваемым параметрам и анализу, некоторые из которых обобщены в таблице 1.

Каждый из данных параметров будет влиять на механизм и скорость деградации масла, поэтому важно понимать их влияние, чтобы максимально приблизить лабораторные условия к условиям двигателя.

Цель исследования – определение различий в термоокислительной стабильности авиационных масел МС-20 (минеральное), Aero Shell Oil W 15W-50 (полусинтетическое) и Turbonycoil 98 (синтетическое).

Таблица 1

Сравнение зарубежных методов испытания

Параметр	FTMS 3411	ASTM D4636	DEFSTAN 05-50, метод 9
Присутствие окисления в методе	–	+	+
Вязкость	+	+	+
Кислотное число	+	+	+
Летучесть	–	+	+
Плотность	–	–	–
Температура вспышки	–	–	–

Для испытания отбиралась проба товарного масла массой 100±0,1 г. Температура испытания изменялась со 160 до 190 °С (с интервалом в 10 °С) и поддерживалась автоматически. После каждого испытания, время которого составляла 8 часов, отбиралась проба масла для оценки его текущих свойств. Проба взвешивалась на весах для определения объема испарившегося масла, затем измерялись оптические свойства масла при помощи фотометра (толщина фотомеческого слоя 2 мм), а также замеряется величина вязкости масла в результате термостатирования.

Термоокислительная стабильность является комплексным показателем, которая определялась по оптической плотности окисленного масла, испаряемости и изменению вязкости.

На рисунке 1 представлены зависимости оптической плотности масел *D* от температуры и времени испытания.

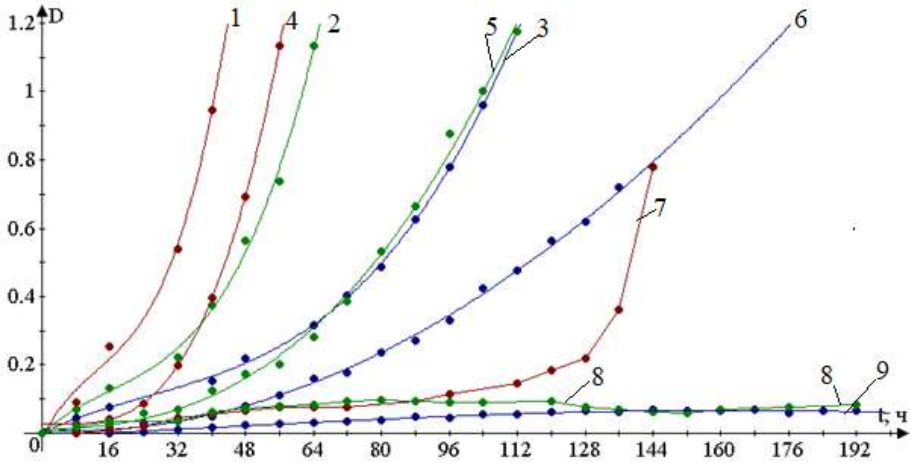


Рис. 1. Зависимости оптической плотности *D* от времени *t* испытания минерального масла при температурах: *1* – 180 ^{0}C, *2* – 170 ^{0}C, *3* – 160 ^{0}C; полусинтетического масла при температурах: *4* – 180 ^{0}C, *5* – 170 ^{0}C, *6* – 160 ^{0}C и синтетического масла при температурах: *7* – 190 ^{0}C, *8* – 180 ^{0}C, *9* – 170 ^{0}C

По зависимостям наблюдается, что с увеличением температуры испытания со 160 до 180 ^{0}C оптическая плотность увеличивается у образца масла минеральной базовой основы в 4,12 раза и полусинтетической базовой основы в 5,6 раза. У образца синтетического масла при температурах испытания 170 и 180 °С оптическая плотность не превышает 0,1 в течении 192

ч испытания, что характеризует устойчивость к окислительным процессам в диапазоне температур до 180 °С по сравнению с другими испытуемыми образцами. При температуре испытания 190 °С активное окисление наблюдалось после 88 ч испытаний, т. к в следующие 56 часов испытания оптическая плотность увеличилась в 8,2 раза.

На рис. 1 показано, что скорость процессов окисления увеличивается с повышением температуры испытания. Так, у образца минерального масла значение оптической плотности равное D = 0.5 достигается при температурах: 160 ^{0}С за 80 часов; 170 ^{0}С за 47 часов; 180 ^{0}С за 30 часов, т.е. с повышением температуры испытания время окисления сокращается в 2,66 раза. У образца полусинтетического масла время окисления сокращается в 2,67 раза.

По данным рис. 1 видно, что наибольшая область сопротивления окислению установлена для синтетического образца масла.

Процесс окисления минерального и полусинтетического масел описывается полиномом третьего порядка для всех температур:

$$D = at^3 + bt^2 + ct + d, \qquad (1)$$

где a, b и c – коэффициенты, характеризующие интенсивность образования продуктов окисления;

d – коэффициент, характеризующий сопротивляемость окислению масел при испытании.

Вязкость окисленных минеральных масел (рис. 2) оценивалась коэффициентом относительной вязкости $\Delta\mu$, определяемым отношением вязкости окисленного масла к вязкости товарного (исходного).

В процессе эксплуатации двигателя увеличивается вязкость масла в связи с тем, что часть легких углеводородов из масла испаряется. В процессе исследования установлено, что вязкость всех масел за время испытания увеличилась по отношению к товарному маслу.

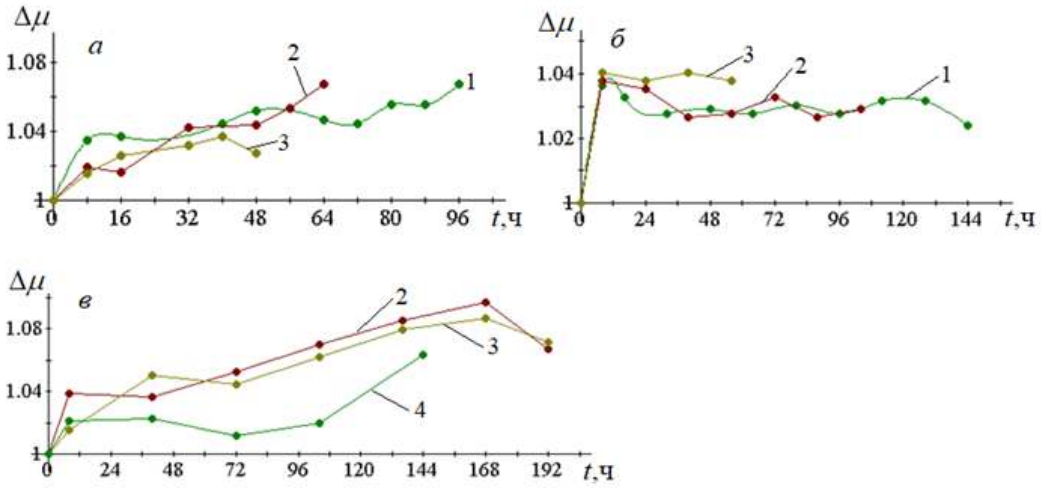


Рис. 2. Зависимости относительной вязкости $\Delta\mu$ от времени t испытания минерального (а), полусинтетического (б) и синтетического (в) авиационных масел при температурах: *1* – 160 ^{0}С, *2* – 170 ^{0}С, *3* – 180 ^{0}С, *4* – 190 ^{0}С

Наиболее интенсивно увеличилась вязкость полусинтетического масла в первые 8 часов за счет минеральной основы, затем она стабилизировалась. Такое увеличение может сказаться на пониженных пусковых свойствах в холодный период эксплуатации двигателя. Вязкость синтетического масла после 168 ч испытания начала колебаться с дальнейшей стабилизацией.

Летучесть масел является важным показателем эксплуатационных свойств. На рис. 3 приведены результаты испытаний масел.

Наибольшая испаряемость установлена для синтетического масла (рис. 1 *в*), наименьшая для минерального масла (рис. 1 *а*). Кроме того, точки на оси ординат указывают на начальное содержание в маслах легких фракций.

Зависимости испаряемости от времени окисления описываются полиномом второго порядка:

$$G = at^2 + bt + c, \quad (2)$$

где a и b – соответственно коэффициенты, характеризующие ускорение испаряемости и ее среднюю скорость;

c – коэффициент, характеризующий концентрацию легких фракций и воды в товарном масле.

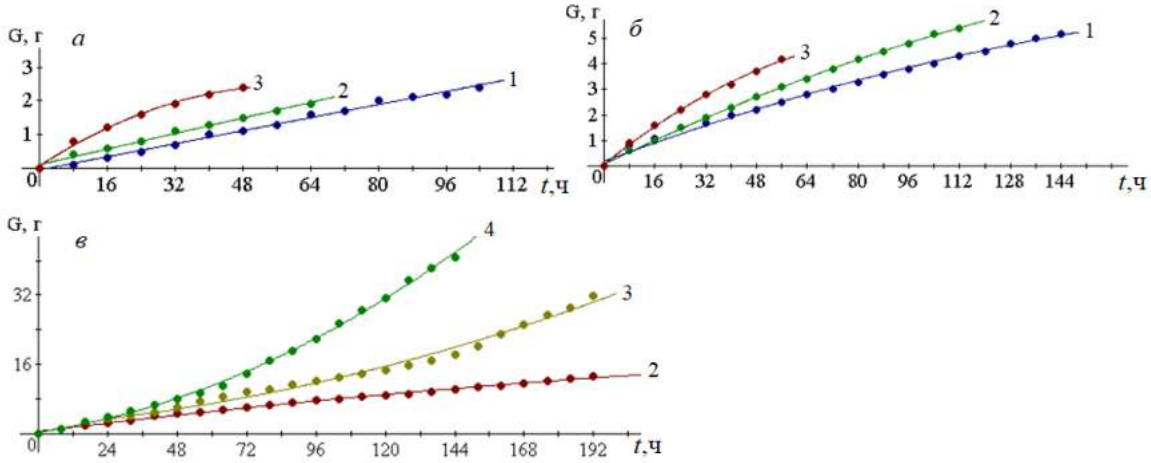


Рис. 3. Зависимости летучести *G* от времени *t* испытания минерального (а), полусинтетического (б) и синтетического (в) авиационных масел при температурах: 1 – 160 ^{0}C, 2 – 170 ^{0}C, 3 – 180 ^{0}C, 4 – 190 ^{0}C

Согласно расчетным данным, средняя скорость испарения наибольшая 0,101 ч$^{-1}$ установлена для полусинтетического и синтетического масел при температуре 180 °С, а наименьшая 0,027 ч$^{-1}$ для минерального масла. Наименьшая концентрация легких фракций и воды установлена для минерального масла – 0,047 г, а наибольшая – 1,858 г, – для синтетического масла.

При испытании масел установлено изменение оптической плотности и испаряемости (рис. 4), поэтому эти параметры характеризуют их термоокислительную стабильность, которая определяется из выражения

$$П_{ТОС} = D + K_G, \quad (3)$$

где $П_{ТОС}$ – коэффициент термоокислительной стабильности;

D – оптическая плотность;

K_G – коэффициент испаряемости масла, г.

В этой связи физический смысл показателя термоокислительной стабильности заключается в том, что он характеризует сопротивляемость масла окислению и испарению, поэтому, чем меньше значение этого показателя, тем выше термоокислительная стабильность данного масла при заданной температуре испытания.

Регрессионные уравнения первого и второго участков зависимостей $П_{ТОС}$ для исследованных масел имеют вид:

минерального, $П_{ТОС} = 0{,}009t + 0{,}0011$ (4)

$П_{ТОС} = 0{,}023t - 0{,}524$ (5)

полусинтетического, $П_{ТОС} = 0{,}0012t + 0{,}0019$ (6)

$П_{ТОС} = 0{,}005t - 0{,}16$ (7)

синтетического , $П_{ТОС} = 0{,}003t + 0{,}0023$ (8)

Согласно уравнениям 4-8, наименьшая средняя скорость образования первичных продуктов окисления установлена для полусинтетического масла, а наибольшая – для минерального масла. Наибольшая средняя скорость образования вторичных продуктов окисления 0,023 $ч^{-1}$ установлена для минерального масла, а наибольшее время начала их образования установлено для полусинетического масла.

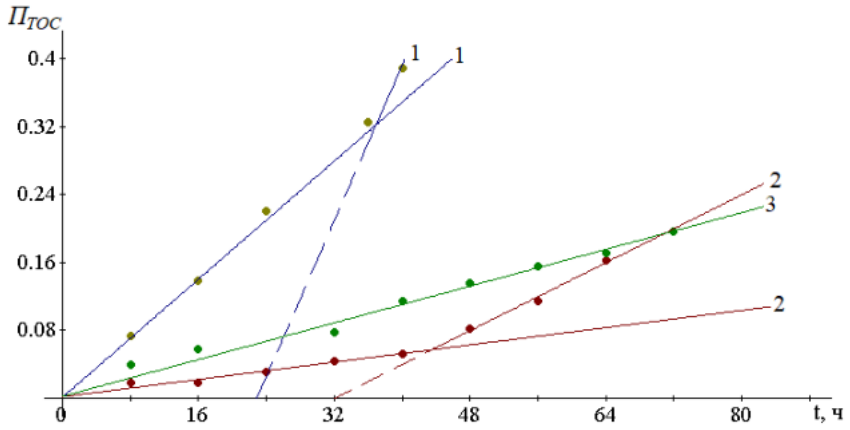


Рис. 4. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности $П_{ТОС}$ от времени при температуре испытаний 180 °С минерального (1), полусинтетического (2) и синтетического (3) авиационных масел

Согласно данным, приведенным на рис. 4, интенсивность изменения коэффициента термоокислительной стабильности для минерального авиационного масла максимальна, а для полусинтетического авиационного масла минимальна. Таким образом, наилучшими противоокислительными свойствами обладает полусинтетическое авиационное масло, т.к. оно имеет минимальный коэффициент термоокислительной стабильности.

Библиографический список

1. ГОСТ 23797-79 Масла для авиационных газотурбинных двигателей. Метод определения термоокислительной стабильности в объеме масла. – Введ. 01.01.81. – М: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 6 с.

2. ГОСТ 981-75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления. – Введ. 01.07.76. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2017. – 6 с.

3. ГОСТ 18136-72 Масла. Метод определения стабильности против окисления в универсальном аппарате. – Введ. 01.07.78. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2017. – 7 с.

4. ГОСТ 20944-75 Жидкости для авиационных гидросистем. Метод определения термоокислительной стабильности и коррозионной активности. – Введ. 01.07.1976. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 7 с.

5. ГОСТ 23175-78 Масла смазочные. Метод оценки моторных свойств и определения термоокислительной стабильности. – Введ. 01.01.1980. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 13с.

6. **Пат. 2334976 Российская Федерация, МПК G01 №25/00.** Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Н.Н. Малышева, А.А. Метелица, Ю.Н. Безбородов; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – № 2006146732; заявл. 26.12.2006; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27. – 7 с.

7. **Пат. 2247971 Российская Федерация, МПК G01 №25/00.** Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, С.И. Васильев, Ю.Н. Безбородов, А.А. Бадьина. – № 2004104761; заявл. 17.02.2004; опубл. 10.03.2005, Бюл. № 7. – 8 с.

8. **Пат. 2371706 Российская Федерация, МПК G01N №25/00.** Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Е.А. Вишневская, Ю. Н. Безбородов, Н.Н. Малышева; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – № 2008115037; заявл. 16.04.2008; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. – 8 с.

9. **Пат. 2618581 Российская Федерация, МПК G01N №25/02.** Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Ковальский Б.И., Петров О.Н., Шрам В.Г., Абазин Д.Д; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – № 2016105635; заявл. 18.02.2016; опубл. 04.05.2017, Бюл. № 18.

10. Оптический метод контроля термоокислительной стабильности моторных масел / Б.И. Ковальский [и др.] //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019, – №12, – С. 562-570.

УДК 621.891:539.2 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_237

В.Д. Самусенко, канд. техн. наук, **И.А. Буяновский,** д-р техн. наук, **М.М. Хрущов,** канд. физ.-мат. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)

ВЛИЯНИЕ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТАМИ ПОДГРУППЫ ХРОМА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Аннотация. *В докладе приведены результаты исследования влияния легирования гидрогенизированных углеродных алмазоподобных покрытий элементами 6-ой группы Периодической таблицы элементов на фрикционно-износные характеристики инактивного, поверхностно-активного и химически активного смазочного материала. Установлено, что легирование молибденом и вольфрамом, обеспечивает исследуемым смазочным материалам более высокие трибологические характеристики.*

The report presents the results of a study of the effect of doping of hydrogenated carbon diamond-like coatings with elements of the 6th group of the Periodic Table of Elements on the friction and wear characteristics of an inactive, surface-active and chemically active lubricant. It is established that the alloying with molybdenum and tungsten provides the studied lubricants with higher tribological characteristics.

Ключевые слова: хром, вольфрам, молибден, легирование, гидрогенизированное углеродное покрытие, антифрикционные свойства, противоизносные свойства

Keywords: chromium, tungsten, molybdenum, alloying, hydrogenated carbon coating, antifriction properties, anti-wear properties

Введение

В последние десятилетия, для защиты от износа и высоких энергетических потерь при трении в режиме граничной смазки, в условиях которого постоянно или периодически работают практически все смазываемые узлы трения [1], на контактирующие поверхности трущихся деталей этих узлов наносят алмазоподобные углеродные покрытия (АПП, англ. DLC). Эти покрытия отличаются высокими твёрдостью и модулем упругости, значительной износостойкостью и химической инертностью [2, 3]. Возможность взаимодействия с активными

компонентами смазочных сред, что необходимо для обеспечения образования на поверхностях контакта трущихся тел слоёв продуктов этого взаимодействия, разделяющего эти поверхности или минимизирующих их непосредственный контакт, обеспечивается за счёт легирования углеродных покрытий некоторыми элементами Периодической системы. При умеренных нагрузках и температурах граничный режим смазки поддерживается вследствие образования на поверхностях контактирующих тел прочных граничных слоёв адсорбционного происхождения. При тяжёлых режимах граничной смазки этого недостаточно, чтобы обеспечить нормальную работу узла трения. Перспективным методом обеспечения работоспособности смазываемых узлов трения при таких условиях может явиться легирование АПП элементом, который в результате трибохимического взаимодействия с активным компонентом смазочной среды образует на поверхностях контакта трущихся тел модифицированный слой, обладающий меньшим сдвиговым сопротивлением, чем материалы контактирующих тел. Ранее, на основании литературных данных [2-5] было предположено, что оптимальными для легирования АПП являются карбидообразующие элементы. Для проверки этого предположения были оценены антифрикционные свойства трёх модельных смазочных сред при трении стали по покрытиям квазимонокристаллическим углеродом *m*-C, легированным тремя карбидообразующими элементами – W, Mo и Si [6]. Результаты экспериментов показали, что легирование *m*-C покрытия W и Mo заметно снизили коэффициенты трения в серосодержащей смазочной среде, в то время как легирование Si мало повлияло на смазочные свойства этой среды по сравнению с антифрикционными свойствами этой среды при трении по нелегированному покрытию. Остаётся не выясненным вопрос, может ли обеспечить тем же смазочным материалам достаточно высокие антифрикционные свойства пара трения «сталь / АПП, легированное металлом», по электронной структуре, а также физическим и химическим свойствам, близким к W и Mo, которые, согласно данным работы [6], обеспечивают прекрасные антифрикционные свойства исследуемым смазочным композициям. Таким металлом является Cr, который вместе с W и Mo, входят в шестую группу Периодической системы (подгруппу хрома). Об исследовании поведения хрома в качестве легирующего АПП элемента известно немного, хотя авторы [7] получили обнадёживающие результаты. Наконец, в отличие от использованной в исследовании [6] в качестве основы АПП квазимонокристаллического углерода *m*-C в настоящем исследовании используется АПП со структурой гидрогенизированного аморфного углерода (*a*-C:H), которые получили широкое распространение в практических приложениях, в том числе, связанных с трибологией.

Целью настоящей работы является оценка влияния легирования переходными металлами подгруппы хрома водородсодержащих алмазоподобных углеродных покрытий на трибологические характеристики трёх модельных смазочных композиций.

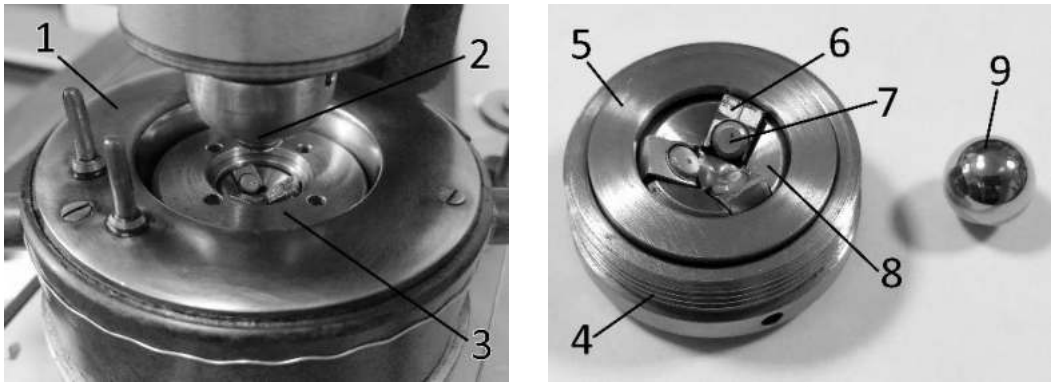
Получение покрытий и методика их испытаний

В качестве исследуемых модельных смазочных сред использовали три композиции: инактивная (полиальфаолефиновое масло ПАО-4), поверхностно-активная (ПАО-4+1% мас. олеиновой кислоты (ОК)) и химически активная серосодержащая (ПАО-4 + 2% мас. присадки ДФ-11 на основе диалкилдитиофосфата цинка). Антифрикционные и противоизносные характеристики этих смазочных сред оценивали применительно к паре трения сталь по стали с АПП, легированным соответственно хромом, молибденом и вольфрамом, на трибометре КТ-2 [8] по схеме трения «вращающийся шар – торцы трёх роликов» с модернизированной оправкой для её реализации. Узел трения машины КТ-2 и его модернизированная оправка [9] приведены на рис. 1.

Как видно из рисунка 1, образцы-ролики 7 установлены в пазах сепаратора 8, вырезанных под углом 35°30±5′ к вертикальной оси. Через кулачки 6 и прижимное кольцо 5 они зафиксированы в этом положении с помощью накидной гайки (на рис. 1 не показана). Геометрически такое расположение образцов верхнего и нижних – воспроизводит такое же распределение нагрузок в четырёхшариковом узле машины трения.

Оправку в сборе (рис. 1, *б*) помещают в масляную чашу 1, заливают исследуемое масло, опускают траверсу со шпинделем 2 так, чтобы верхний изнашивающий образец 9 (шарик

диаметром 12,7 мм) соприкоснулся с торцами образцов-роликов 7, нагружают узел трения машины КТ-2 (осевая нагрузка 108 Н), и включают двигатель машины, приводящий шпиндель во вращение с частотой 1 мин$^{-1}$, что обеспечивает при данной геометрии линейную скорость 0,375 мм/с. Продолжительность испытания при этих условиях 60 минут. В процессе испытания регистрируется коэффициент трения; после его окончания фотографируются пятна износа на нижних образцах и замеряются их диаметры.



а *б*

Рис. 1. Узел трения машины КТ-2 в сборе (*а*) и модернизированная оправка с образцами (*б*): *1* – масляная чаша, *2* – шпиндель машины, *3* – оправка в сборе, *4* – корпус оправки, *5* – прижимное кольцо, *6* – кулачок, *7* – нижний образец, *8* – конический сепаратор, *9* – изнашивающий шарик

В качестве образцов роликов 7 и изнашивающего шарика 9 использовали стандартные детали подшипников качения: шарик диаметром 12,7 мм и ролики диаметром 5 мм и длиной 8 мм. Они изготовлены из стали ШХ-15. Легированные алмазоподобные покрытия Cr-DLC, Mo-DLC и W-DLC толщиной 3 мкм были нанесены на предварительно отполированные (Ra = 0,06) торцы роликов. Нанесение покрытий проводили на установке ИВП-1, конструкция которой была разработана в ООО «ИНАКОТЕК ЦЕНТР» (г. Москва). При нанесении использовали метод реактивного магнетронного распыления и металлические мишени из соответствующих металлов. В качестве реактивного газа использовали технический ацетилен, в качестве рабочего газа – очищенный аргон; особенности используемой технологии магнетронного нанесения покрытий были описаны ранее в работе [10].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Данное исследование включало оценку трибологического поведения при граничной смазке пар трения системы «сталь – *a*-C:H:Me», где Me – хром, молибден или вольфрам. Ниже приводятся результаты исследования влияния легирования этими элементами гидрогенизированного углеродного АПП при трении по стали в характерных смазочных средах – на антифрикционные и противоизносные свойства этих смазочных сред в режиме граничной смазки. Результаты трибологического эксперимента приводятся на рис. 2,*а* – *г*, на которых представлены зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний исследуемых смазочных сред в условиях граничного трения шаров из стали ШХ-15 по торцам роликов из стали ШХ-15 с нанесенными легированными покрытиями. Влияние легирования АПП на износ покрытий представлено на рис. 3, а микрофотографии пятен износа – на рис. 4.

Как видно из рис. 2, из трёх переходных металлов, легирующих исследуемое АПП, наибольшее снижение коэффициента трения по стали для всех трёх модельных смазочных сред, а также при сухом трении (рис. 2, *а*) обеспечил молибден. Наиболее высокий коэффициент трения был получен при испытании АПП, легированного хромом (рис. 2, *г*). Легирование вольфрамом обеспечило промежуточный уровень влияния на смазочные свойства исследуемых смазочных композиций.

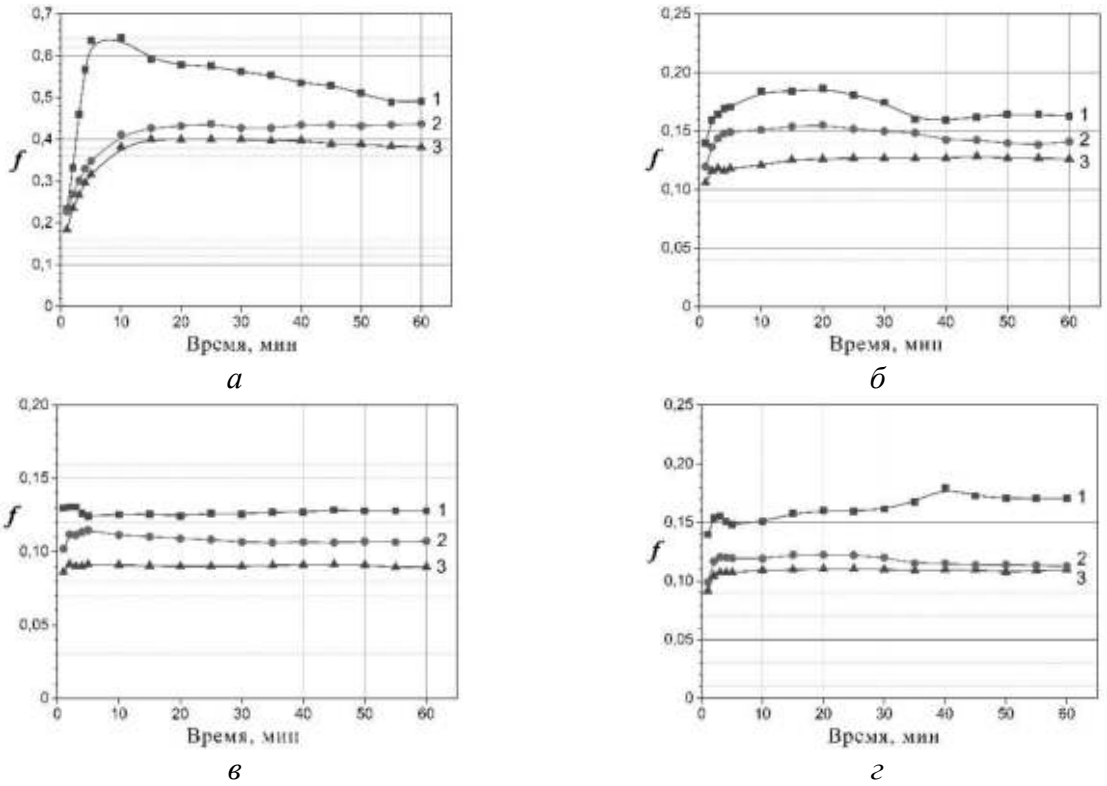


Рис. 2. Влияние алмазоподобных углеродных покрытий на коэффициенты трения в смазочных средах: *а* – без смазочной среды; *б* – в инактивном масле ПАО-4*; в* – ПАО-4+1% олеиновой кислоты; *г* – в ПАО-4+2% ДФ-11; Здесь *1* – покрытие Cr-DLC, *2* – покрытие W-DLC, *3* – покрытие Mo-DLC

На рис. 3 представлена гистограмма значений диаметров пятен износа описанных выше легированных АПП, вытертых в процессе трибологических испытаний, проведённых на машине КТ-2 по описанной методике в результате 60-минутного изнашивания в указанных смазочных средах и (для сравнения) – в отсутствии смазочного материала.

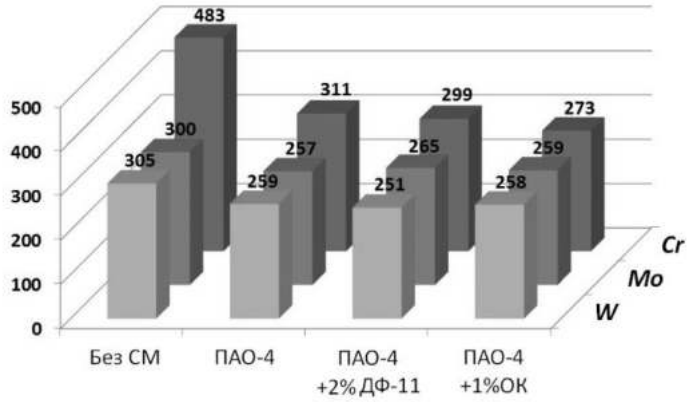


Рис. 3. Гистограмма значений диаметров пятен износа на торцах нижних образцов-роликов с АПП, легированными Cr, Mo и W, испытанных на машине КТ-2 в трёх смазочных средах: масле ПАО-4, и в том же масле с соответственно присадками химически активной (ДФ-11) и поверхностно-активной (олеиновая кислота)

По результатам измерений пятен износа АПП при полученных сочетаниях состава АПП и вида смазочного материала, приведённым на рис. 3, можно заключить, что покрытия, легированные молибденом и вольфрамом, смазываемые ПАО-4 и ПАО-4 с обеими присадками мало отличаются друг от друга (диаметры пятен износа в пределах 0,251-0,265 мм). При трении без смазки диаметры пятен износа несколько повышаются (0,300-0,305 мм). Иначе ведут себя

покрытия, легированные хромом. Износы этого покрытия монотонно возрастают по мере перехода от смазки ПАО-4+ОК к маслу ПАО-4 без присадок (от 0,273 до 0,311 мм) и резко повышаются при «сухом» трении стали по АПП (0,483 мм).

Экспериментальные результаты, приведённые на рис. 2 и 3 говорят о несомненном влиянии легирующих добавок Cr, Mo и W, вводимых в гидрогенизированное аморфное углеродное покрытие, на трибологические характеристики смазочных материалов.

Из микрофотографий пятен износа, приведённых на рис. 4, видно, что наличие смазочной среды, её поверхностная и химическая активность, а также природа элемента, легирующего исследуемые покрытия, оказывает заметное влияние не только на коэффициенты трения пары «сталь – покрытие Me-DLC» (рис. 2), и диаметры пятен износа, образовавшихся на поверхностях этих покрытий (рис. 3), но также и на состояние их поверхности. Так, на поверхности пятна износа, полученного при «сухом» трении, стали по АПП, легированному Cr, чётко видны грубые борозды и местные вырывы материала покрытия (рис. 4, *а*). При легировании того же покрытия соответственно Mo и W диаметры пятен износа снижаются более, чем на 40%, их поверхности существенно выглаживаются, борозды менее глубоки, следы вырывов отсутствуют. При трении стали по Cr-DLC, смазываемому инактивным маслом ПАО-4 (рис. 4, *б*), поверхность пятна износа более гладкая, хотя на поверхности видна крупная частица износа, по-видимому, перенесённая с контртела. При смазывании тем же маслом покрытий, легированных Mo и W, следы схватывания на пятнах износа рис 4, *е* и 4, *к*) полностью отсутствуют. При смазывании композициями соответственно ПАО-4+2%ДФ-11 и ПАО-4+1%ОК на пятнах износа покрытий, легированных Cr, наблюдаются достаточно глубокие борозды, хотя наблюдается некоторое выглаживание поверхностей по мере перехода от рис. 4, *в* к 4, *г*.

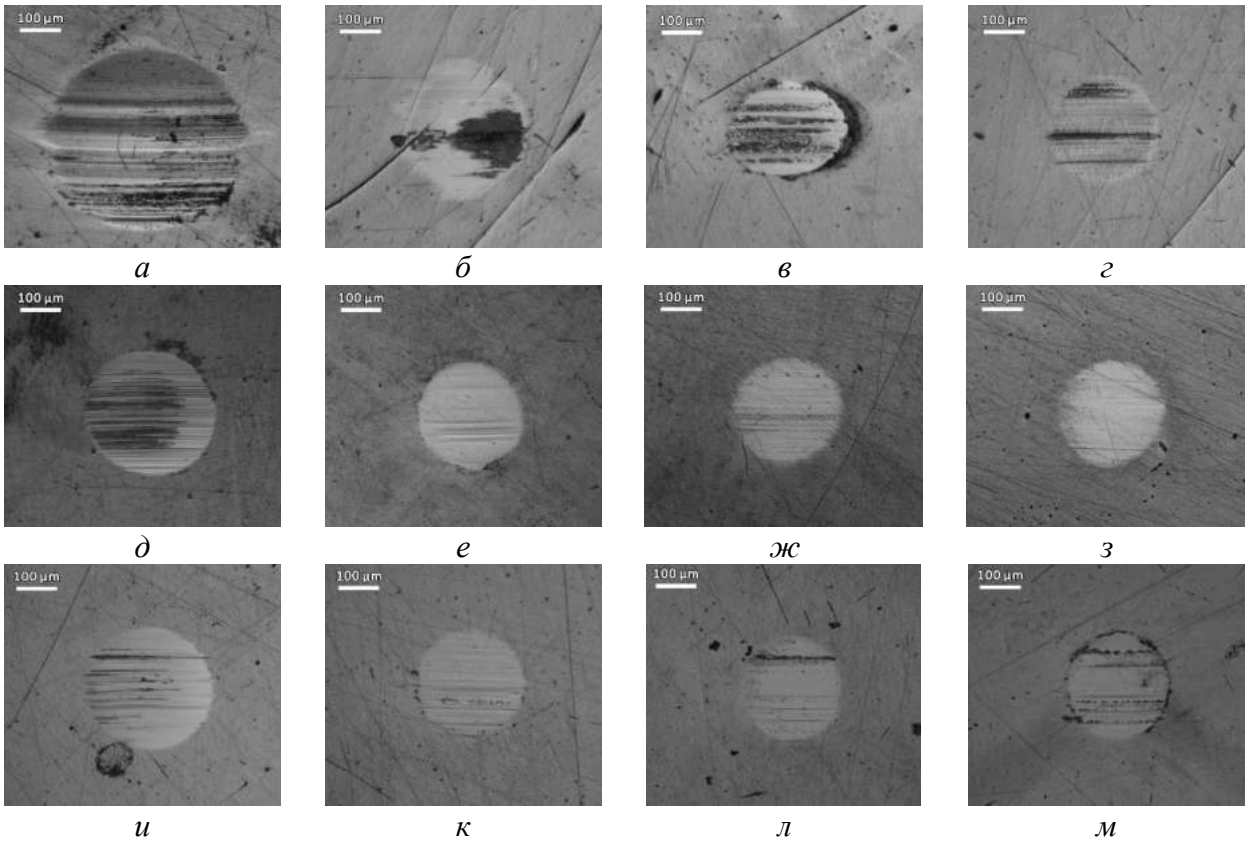


Рис. 4. Микрофотографии пятен износа для пар трения соответственно: сталь – Cr-DLC (*а-г*), сталь – Mo-DLC (*д-з*) и сталь – W-DLC (*и-м*): (*а*), (*д*) и (*и*) – без смазочного материала; (*б*), (*е*) и (*к*) – при смазке ПАО-4; (*в*), (*ж*) и (*л*) – при смазке ПАО-4+2%ДФ-11; (*г*), (*з*) и (*м*) – при смазке ПАО-4+1%ОК

Сравнивая результаты наблюдений пятен износа, приведённых на рис. 4, с результатами оценки коэффициентов трения (рис. 2) и диаметров пятен износа (рис. 3), можно прийти к

выводу о том, что применение смазочных материалов в значительной степени сглаживает различие фрикционно-износного поведения анализируемых АПП. При этом можно также отметить, что в стальных парах трения с покрытием Mo-DLC, нанесенным на одну из их поверхностей, положительный эффект от их использования оказался несколько выше, чем от АПП двух других типов, что говорит о некотором его возможно преимуществе по сравнению с ними.

Заключение

Анализ совокупности полученных авторами экспериментальных данных позволил установить, что на антифрикционные и противоизносные свойства смазочных сред при трении стали по легированным алмазоподобным углеродным покрытиям, значительное влияние оказывает присутствие хрома, молибдена и вольфрама в них. Применение покрытий Mo-DLC и W-DLC, которые обеспечивают более низкие коэффициенты трения и диаметры пятен износа, чем покрытие Cr-DLC, наиболее эффективно в сочетании с поверхностно-активными и химически активными смазочными материалами. Для уточнения границ эффективности антифрикционного действия легированных хромом, молибденом и вольфрамом алмазоподобных покрытий необходимо продолжение их лабораторных и стендовых испытаний в широком интервале нагрузок, скоростей и температур.

Благодарности

Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-01011-а). Благодарим М.В. Атаманова и В.И. Мирошниченко за нанесение легированных алмазоподобных покрытий, использованных при проведении трибологических испытаний.

Библиографический список

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.] // – М.: Машиностроение, – 2003. – 576 с.
2. **Bewilogua, K.** History of diamond-like carbon films—from first experiments to worldwide applications / K. Bewilogua, D. Hofmann // Surface and Coatings Technology. – 2014, – Т. 242, – С. 214-225.
3. Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: a review / Zahid, R. [et al.] //Tribology Letters. – 2015, – Т. 58, – №. 2, – С. 1-28.
4. Combination of DLC coatings and EP additives for improved tribological behaviour of boundary lubricated surfaces / B. Podgornik [et al.] //Wear. – 2006, – Т. 261, – №. 1, – С. 32-40.
5. **Podgornik, B.** Tribological reactions between oil additives and DLC coatings for automotive applications / B. Podgornik, J. Vizintin //Surface and Coatings Technology. – 2005, – Т. 200, – №. 5-6, – С. 1982-1989.
6. **Буяновский, И.А.** Влияние на антифрикционные свойства смазочных сред легирования ориентирующих углеродных покрытий карбидообразующими элементами / И.А. Буяновский, А.Н. Большаков, В.А. Левченко // Трение и износ. – 2018, – Т. 39, – № 5, – С. 471-476.
7. Friction and wear performance of diamond-like carbon and Cr-doped diamond-like carbon coatings in contact with steel surfaces / H. Renondeau [et al.] //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2008. – Т. 222. – №. 3. – С. 231-240.
8. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний / Р.М. Матвеевский [и др.] // Справочник. – М.: Машиностроение, – 1989. – 224 с.
9. **Буяновский, И.А.** Модернизация узла трения машины КТ-2 для оценки антифрикционных характеристик тонких покрытий при трении в режиме граничной смазки / И.А. Буяновский, В.Д. Самусенко, Ю.И. Щербаков // Заводская лаборатория: Диагностика материалов. – 2019, –Т. 85, – № 12, – С. 65-68.

10. Алмазоподобные нанокомпозитные покрытия *a*-C:H:Cr – структурное состояние, механические и трибологические свойства / М.М. Хрущов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2014, – Т. 78, – №. 10, – С. 1257-1257.

УДК 629.4 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_243

Н.С. Семин (ООО «Трансойл»), **И.В. Больших,** канд. техн. наук, **Д.С. Мантуров,** канд. техн. наук, **Е.П. Морозова** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ТРИБОУЗЛОВ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. *Рассмотрены причины вывода вагонов из эксплуатации в текущий отцепочный ремонт. Предложены возможности управления трибологическими характеристиками шкворневого узла тележки 18-100, за счет применения гибридных композитов и совершенствования конструкции.*

The reasons for the decommissioning of wagons in the current uncoupling repair are considered. The possibilities of controlling the tribological characteristics of the pin assembly of the trolley 18-100 are proposed, due to the use of hybrid composites and design improvement.

Ключевые слова: процессы изнашивания, технология восстановления, модернизация конструкции, разработка новых композиционных материалов.
Keywords: wear processes, restoration technology, design modernization, development of new composite materials.

Несмотря на негативное влияние пандемии и связанное с этим снижение объема производства и потребления в ряде государств объем внешнеторговых перевозок в адрес морских портов России в текущем году дает положительные сигналы участникам транспортного рынка.

По данным исследований Института проблем естественных монополий (ИПЕМ) в 2021 году наблюдается восстановление объема погрузки на сети железных дорог в сравнении с допандемийным 2019 годом. При этом по отдельным сегментам рынка спрос на перевозку остается неудовлетворенным в полном объеме и имеются перспективы восстановления объема погрузки не только к 2020, но и к 2019 году.

В тоже время необходимо отметить, что частота вывода вагонов из эксплуатации в текущий отцепочный ремонт (ТОР) по сети ежегодно возрастает ($К_ф$ – 1,13 за 2020 год), соответственно снижается коэффициент полезного использования вагонов.

Анализ ПКБ ЦВ свидетельствует о стабильно высоком объеме поступления грузовых вагонов в ТОР по всем видам неисправностей. При этом, по-прежнему одними из основных причин поступления грузовых вагонов в ТОР являются неисправности колесных пар и элементов шкворневого узла.

Считаем необходимым напомнить всем известные факты, что катастрофический износ колес и рельсов, который в настоящее время имеет место на подвижном составе – это следствие нарушения оптимального соотношения твердостей колеса и рельса. А проводимая в текущий период работа по повышению ресурса элементов верхнего строения пути (внедряются рельсы железнодорожные типа Р65 дифференцированно термоупрочнённые прокатного нагрева общего назначения категории ДТ350, которые обладают повышенной износостойкостью и контактной выносливостью) по сути «обрекают» вагон на многократные отцепки во внеплановый ремонт для обточки колесных пар. Наряду с этим, высокий уровень динамических нагрузок и эксплуатация подвижного состава железных дорог в широком

диапазоне изменения климатических условий ускоряют процессы изнашивания шкворневого узла и значительно снижают его ресурс [1,2].

Рис. 1. Тележка грузового вагона 18-100

Вместе с тем, вопросам повышения надежности и увеличения ресурса трибоузлов самой распространенной на постсоветском пространстве модели тележки грузового вагона 18-100 (рис. 1) должного внимания не уделяется [3] Решению этих вопросов в краткосрочном периоде могут способствовать следующие мероприятия:

- развитие технологии восстановления литых деталей тележки до номинальных размеров на основе прогрессивных методов наплавки, в том числе с использованием робототехнических комплексов;
- модернизация конструкции, уже эксплуатируемых узлов тележек вагонов;
- разработка новых композиционных материалов и упрочняющих технологий в контактных парах трения узлов тележки вагона (узел пятник – подпятник (рис. 2), наклонная поверхность надрессорной балки – фрикционный клин, корпус буксы – контактирующие поверхности челюстного проема боковой рамы) [4].

Ремонт изношенных контактных поверхностей в основном производится наплавкой и Технологический процесс ремонта предусматривает операции по демонтажу и последующей установки пятников. Применение данного способа сопровождается рядом недостатков: срезание заклепок, соединяющих пятник с хребтовой балкой; отсутствие точности центровки; нарушение базирования; увеличение времени нахождения вагона на ремонтной позиции). Операции по восстановлению изношенных поверхностей является трудоемкой и дорогостоящей операцией, выполняемой в условиях депо.

Совершенствование не технологии ремонта шкворневого узла, а его конструкции, позволит достичь повышения надежности и увеличения ресурса, что в конечном итоге позволит значительно уменьшить затраты на ремонт вагонов. Одним из перспективных способов совершенствования конструкции рассматриваемого узла является метод деления пути. Механизм деления пути трения состоит из стального промежуточного диска, расположенного между рабочими поверхностями пятника и подпятника. Диск имеет на расстоянии примерно 2/3 от центральной оси четыре конических штифта. Штифты установлены по два на каждой стороне диска, располагаясь в одном диаметральном сечении. Они входят в одинаковые пазы, выполненные по дуге окружности на контактных поверхностях подпятника и пятника. Пазы расположены зеркально и выполнены таким образом, что штифты на нижней поверхности диска входят в пазы подпятника, а штифты на верхней поверхности диска – в пазы пятника. Таким образом, штифты промежуточного диска соединяют через пазы контактирующие поверхности подпятник – пятник и равны по ширине наибольшему диаметру штифтов. Сумма длин двух круговых пазов на пятнике и подпятнике за минусом двух диаметров штифта равна дуге, соответствующей наибольшему взаимному перемещению подпятник– пятник при движении вагона по круговому участку пути.

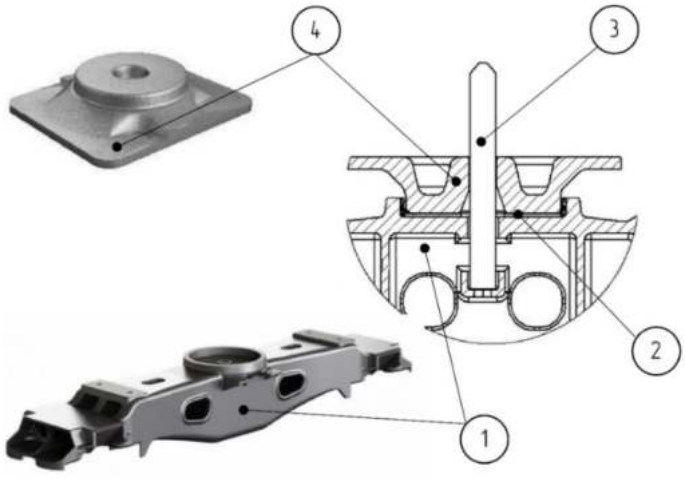


Рис. 2. Узел «пятник – подпятник» тележки грузового вагона:
1 – надрессорная балка; *2* – прокладка подпятника; *3* – шкворень; *4* – пятник

Конструкция в сборе представляет собой пакет, в котором расположенный между подпятником и пятником стальной диск, который входит штифтами, установленными на его нижней поверхности, в т. А (рис. 3) пазов на поверхности подпятника. Штифты, расположенные на верхней поверхности диска, входят в т. В пятника.

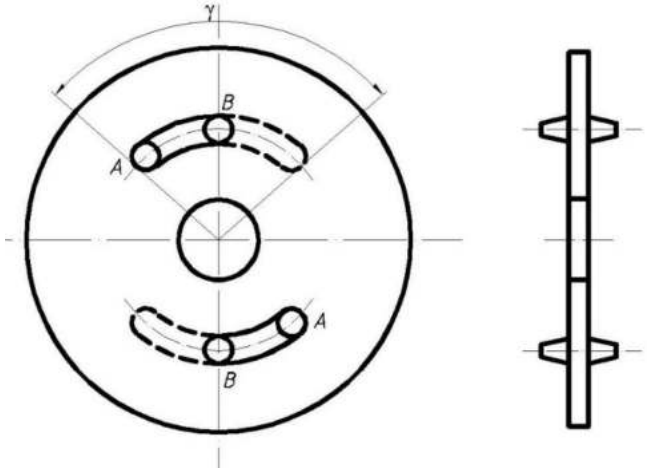


Рис. 3. Схема работы механизма деления пути трения

Процесс возвратно-вращательного движения диска сопровождается перемещением его поверхности с наименьшим коэффициентом трения. При этом штифты на этой поверхности перемещаются внутри пазов. Если дуга перемещения контактирующей поверхности диска больше длины паза, то штифт, упираясь в конец паза, где совершалось движение, перемещает центральный диск на другой поверхности. Отсюда можно сделать вывод, что общий путь трения подпятник – пятник разделяется центральным диском на две части подпятник – диск и диск – пятник. Таким образом, путь трения функциональных частей трибоузла сокращается, что снижает величину износа и увеличивает ресурс трибосистемы [5].

Стоит отметить, что процесс модернизаций тележек ограничивается тем, что требует значительного ресурса времени и финансовых затрат на их внедрение.

Применяемые материалы и режимы трения оказывают значительное влияние на фрикционные свойства материалов. Использование композиционных материалов на основе полимера позволит повысить эксплуатационные свойства трибоузла. Рассматриваемый материал включается в состав пластины укладываемой в пятник надрессорной балки. Преимущества данного метода заключаются в том, что в процессе его реализации не требуется изменять конструкцию трибоузла и свойства сопрягаемых поверхностей [6,7].

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что применение гибридных наполнителей позволяет, за счет изменения состава, получить требуемое значение

коэффициента трения, что значительно улучшает трибологические характеристики трибосопряжения. Состав композита был выбран следующим: фенилон С-2 + фторопласт-4МБ (10 %) + аримид-Т (5 %) + шпинель (3 %).

Исследования осуществлялись на стенде (рис.4), имитирующем условия груженого вагона при прохождении кривых участков пути.

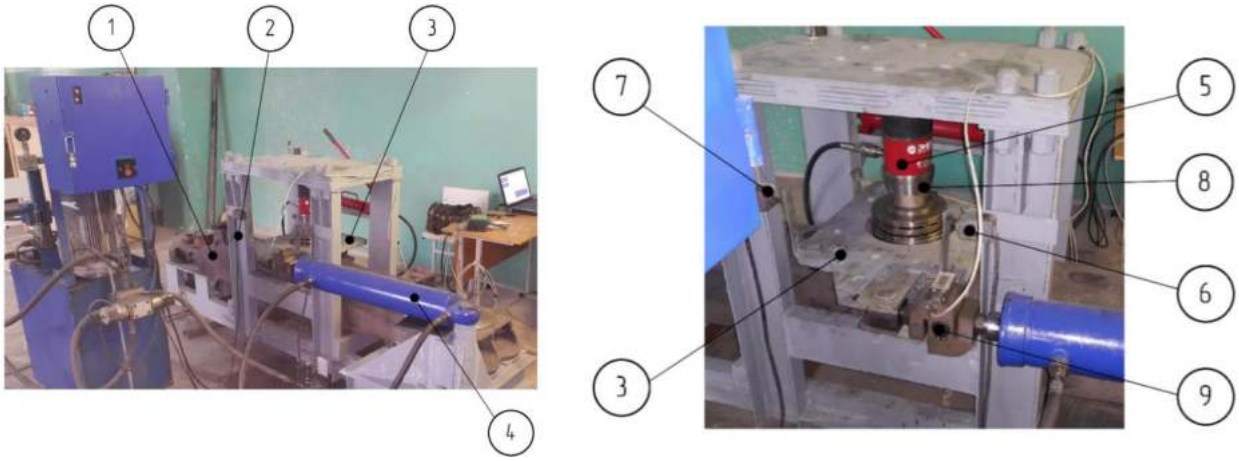


Рис.4. Стенд «пятник – подпятник»:
1 – надрессорная балка; *2* – станина; *3* – пятник; *4* – гидроцилиндр перемещения пятника; *5* – гидравлический домкрат; *6, 7* – концевые датчики; *8* – тензорезисторный датчик UU; *9* – S-образный тензорезисторный датчик

Исследуемый образец устанавливается в подпятник и прижимается пятником. Усилие прижима пятника создается домкратом и контролируется тензорезисторным датчиком UU (8). Сила сопротивления, развиваемая в пятниковом узле при перемещении пятника по образцу, измеряется S-образным тензорезисторным датчиком (9). Регистрация значений нагрузки и силы трения осуществляется при помощи предусилителя ZET 410 и модуля АЦП ЦАП ZET 210.

Испытания проводились с исходными стальными и модифицированными разработанными композитами прокладками.

Для проведения исследований были изготовлены оснастки в виде дисков диаметром 300 мм и толщиной 8 мм. В диске выточены отверстия по трем спиралям со сдвигом 60° по 8 шт в спирали. Отверстия выполнялись диаметром 10 мм и глубиной 4 мм. В подготовленные технологические отверстия запрессовывались исследуемые полимеры и композиции на их основе (рис. 5).

Рис. 5. Прокладка узла «пятник – подпятник»

При использовании полимерных композитов с нанодобавками коэффициент трения остается равным 0,2 в течение 20 часов эксперимента.

Выводы

Анализируя предложенные мероприятия, направленные на повышение надежности и ресурса, рассматриваемого трибоузла, можно сделать вывод, что наиболее перспективным является применение полимерных композитов с нанодобавками. Данный способ позволит достичь экономии значительного ресурса времени и финансовых затрат на его внедрение.

Указанные мероприятия должны быть допущены к применению в вагоноремонтном комплексе и внесены в соответствующие нормативные документы.

Результаты должны быть равнодоступны операторам и владельцам подвижного состава, а также вагоноремонтным предприятиям для принятия управленческих решений по оптимизации стоимости жизненного цикла вагона.

Отмеченные направления, вектора для дальнейших исследований и дискуссий не являются конечно исчерпывающим списком, но в полной мере отражают потребность участников транспортного рынка не только владельцев инфраструктуры, но собственников и операторов подвижного состава.

Библиографический список

1. **Колесников, В.И.** Влияние коэффициента трения в узле «пятник – подпятник» грузовых вагонов на работу сил трения при движении в кривой / В.И. Колесников, А.А. Зарифьян, А.П. Сычев // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, № 5. – С. 614–622.

2. **Kolesnikov, I.V.** Frictional transfer and the self-organization phenomenon in the friction / I.V. Kolesnikov, D.S. Manturov// 13th International Conference on Films and Coatings // Journal of Physics: Conf. Series 857, 2017. –P. 197–200.

3. Повышение долговечности сопряжения пятникового узла вагонов / В.И. Колесников [и др.] // Юбилейный сборник научных трудов семинара, посвященного 60-летию ректора РГУПС, члена-корреспондента РАН, доктора технических наук, проф. В.И. Колесникова. – 2001, 74-80.

4. **Каракаев, А.К.** Композитные материалы в грузовом вагоностроении / А.К. Каракаев, Р.Ю. Зарипов // Наука и техника Казахстана. – 2016. – № 1-2. – С. 4-9.

5. **Кохановский, В.А.** Совершенствование конструкции шкворневого узла подвижного состава / В.А. Кохановский, Н.В. Нихотина, И.В. Больших// Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. - 2021-№ 1(54). - С.28 - 31.

6. Исследование взаимодействия пути и подвижного состава в США // Железные дороги мира. – 1991. – № 9. – С. 45–48.

7. **Мантуров, Д.С.** Улучшение параметров фрикционного контакта «колесо – рельс» / Д.С. Мантуров // Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство: тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д, 2009.

УДК 621.8 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_247

А.С. Фетисов (Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева)

МЕХАТРОННЫЙ ПОДШИПНИК СКОЛЬЖЕНИЯ, СМАЗЫВАЕМЫЙ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Аннотация. *В статье представлены результаты моделирования динамики ротора на подшипниках скольжения, смазываемых магнитореологическим смазочным материалом. Приведены зависимости параметров жесткости и демпфирования подшипников от частоты вращения ротора и индукции приложенного магнитного поля. Приведена зависимость собственных частот ротора от частоты вращения.*

Сделаны выводы об применимости магнитореологических смазочных материалов в роторных системах с активным управлением.

The article presents the results of modeling the dynamics of a rotor on plain bearings lubricated with magnetorheological lubricant. The dependences of the parameters of stiffness and damping of bearings on the rotor speed and induction of the applied magnetic field are given. The dependence of the natural frequencies of the rotor on the rotation frequency is given. Conclusions are drawn about the applicability of magnetorheological lubricants in rotor systems with active control.

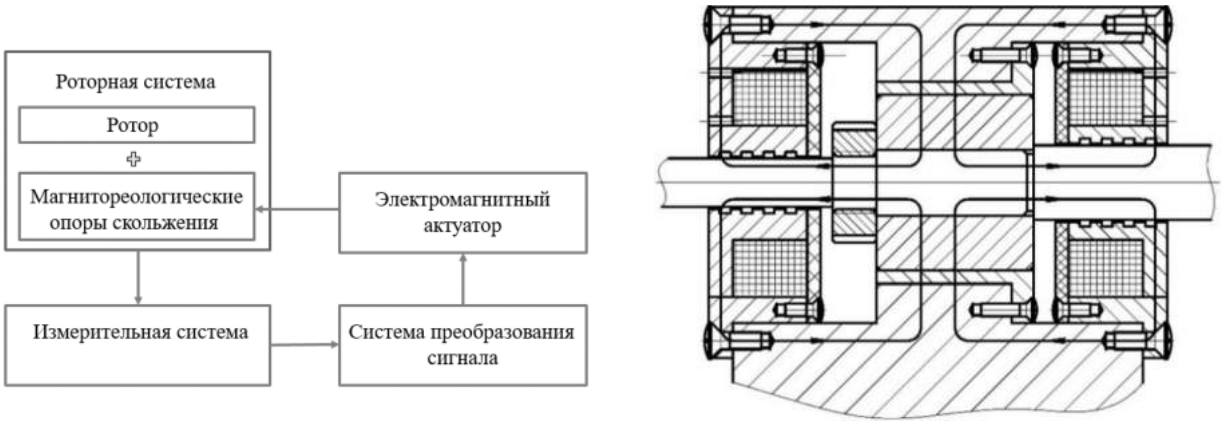
Ключевые слова: мехатронная роторная система, подшипник скольжения, магнитореологический смазочный материал, динамические характеристики.
Key words: mechatronic rotor system, sleeve bearing, magnetorheological lubricant, dynamic characteristics.

Использование систем управления в области роторных машин необходимо для улучшения рабочих характеристик: уменьшения амплитуды гармонических колебаний на определенных режимах работы [1], уменьшения общего уровня вибраций [2], минимизации потерь на трение в опоре [3]. Реализация управления роторной машиной осуществляется за счет изменения геометрии зазора [4,5], либо за счет управления расходом и давлением смазочного материала [6]. Управление реологическими характеристиками смазочного материала является обособленной и актуальной областью исследований роторной динамики, так как применение магнитореологических смазочных материалов позволяет не использовать данные методы управления характеристиками роторной машины. Существует две основных методики применения магнитореологических жидкостей (МРЖ): магнитореологическое текстурирование [7] и использование в качестве смазочного материала гидродинамических опор скольжения [8,9]. Использование магнитореологических смазочных материалов для упорных подшипников позволяет значительно повышает жесткость и демпфирование подшипника [10-12]. Работы в области магнитореологических радиальных опор скольжения зачастую показывают различные выводы о применимости МРЖ. Это связано с различиями в конструкциях моделируемого подшипника. Источником тока может служить провод с током [13], радиально установленная катушка с током [14], катушка, образующая полюсный источник магнитного поля [15]. Также существуют теоретические работы, в которых описывается подшипник скольжения, охватываемый радиально направленным магнитным полем [16,17]. В подобных работах указывают на значительное увеличение грузоподъемности подшипника при возрастании напряженности магнитного поля.

Задача, рассматриваемая в данной работе, заключается в исследовании гладкой опоры скольжения, смазываемой магнитореологической жидкостью. Магнитное поле равномерное и направлено строго в радиальном направлении. Конструкция подшипникового узла, включающая рассматриваемый подшипник, представлена на рисунке 1,б.

Особенностью данного подшипникового узла является соосное расположение электромагнитных актуаторов и подшипника скольжения. Эта особенность позволяет достичь радиально направленного магнитного поля равной напряженности в каждом поперечном сечении подшипника [18]. Рассматриваемая опора в совокупности с информационно-измерительной системой представляет собой классическую мехатронную систему (рисунок 1, а).

На основе представленной конструкции было проведено моделирование интегральных и динамических характеристик роторной системы на магнитореологических подшипниках скольжения. Результаты моделирования интегральных параметров представлены в работах [18-21]. В работах представлены выводы об увеличении момента трения подшипника вместе с возрастанием гидродинамического давления и грузоподъемности опоры. Это приводит к эффекту центрирования цапфы ротора по отношению к втулке подшипника.



а *б*

Рис. 1. Мехатронная роторная система (а) и входящий в ее состав подшипниковый узел (б)

Динамическое поведение ротора моделировалось на основе модели гибкого ротора. Уравнения динамики гибкого ротора описаны на основе уравнения Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial q_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}+\frac{\partial V}{\partial q_i}=Q_i, \tag{1}$$

где q_i и q_i - обобщенные координаты и скорости соответственно,

T - кинетическая энергия,

V - потенциальная энергия,

Q_i - обобщенные силы.

Подробно описание применения уравнения Лагранжа приведено в работах [22-25]. Модель гибкого ротора описана при помощи метода конечных элементов. Решение задачи динамики основано на последовательном описании модели определения перемещений и углов поворота, определении потенциальной и кинетической энергии, определении обобщенных сил.

Использование модели гибкого ротора оправдано тем, что динамика ротора исследовалась в окрестностях первой критической частоты. Ротор опирается на два подшипника скольжения, смазываемых магнитореологической жидкостью. На роторе закреплены две массы, имитирующие диски (рисунок 2). Также в точках приложения дополнительных инерционных масс прикладываются дисбалансы для моделирования траекторий вращения ротора.

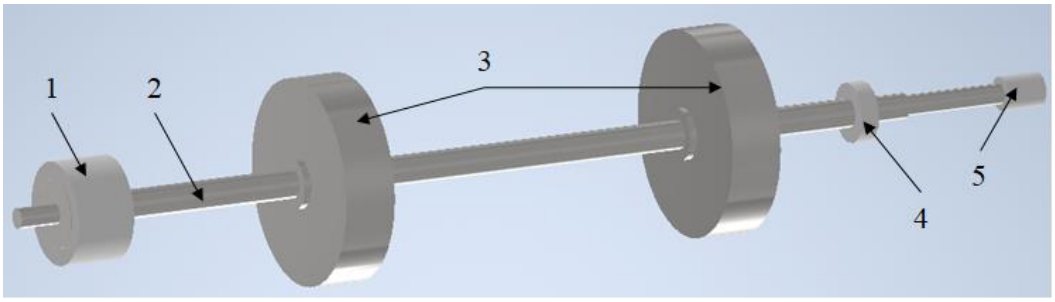


Рис. 2. Схема ротора: *1* – левый ПС, *2* – вал, *3* – диски, *4* – правый ПС, *5* – муфта.

Стационарная задача по определению интегральных характеристик и задача динамики связаны при помощи линеаризации реакции в окрестностях положений равновесия ротора. В данном исследовании был использован метод малых перемещений. При помощи данного метода были определены коэффициенты жесткости (рисунок 3) и демпфирования (рисунок 4). Следует отметить, что были определены как прямые, так и перекрестные коэффициенты жесткости и демпфирования. Результаты моделирования подтверждают тот факт, что с увеличением частоты вращения ротора как жесткость, так и демпфирование ротора

увеличиваются. С ростом приложенного магнитного поля происходит также увеличение данных параметров, что приводит к изменению динамического поведения ротора. Следует отметить то, что жесткость и демпфирование в системе изменяется не пропорционально, что должно привести к неустойчивым режимам работы ротора.

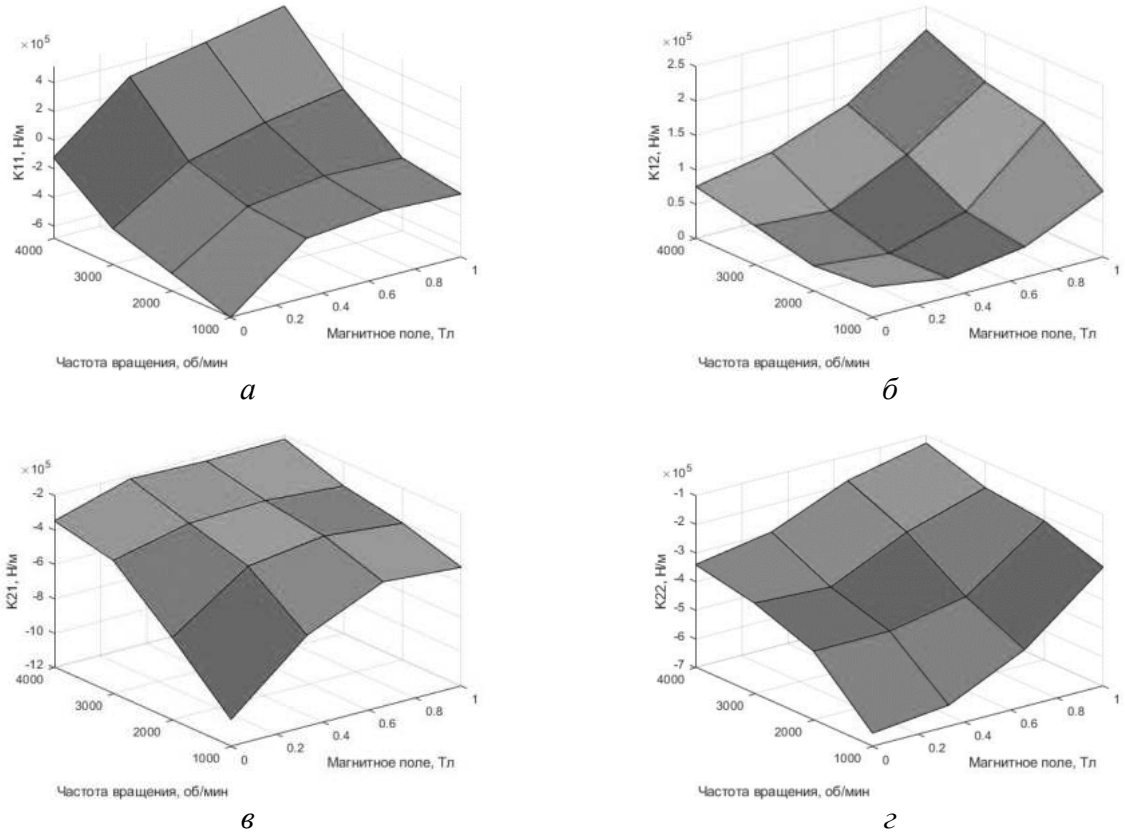
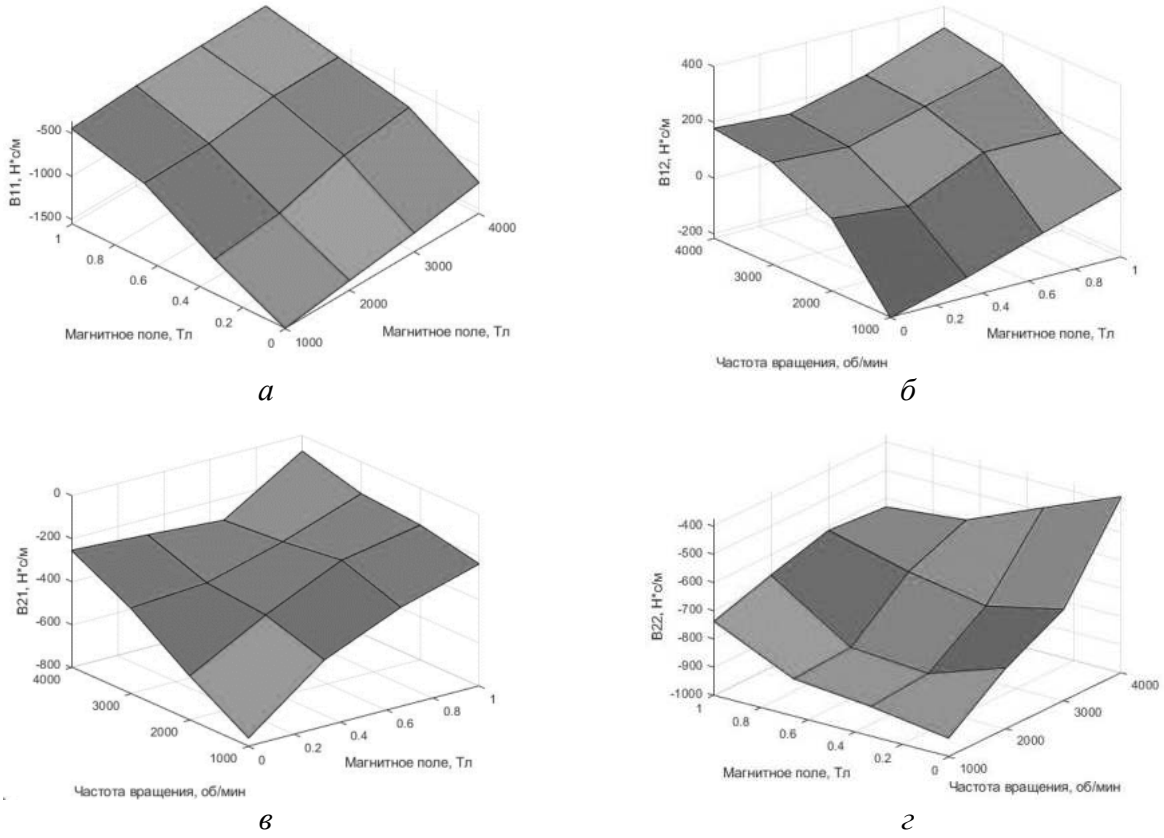


Рис. 3. Коэффициенты жесткости

Расчет траекторий показал, что с ростом частоты вращения геометрический центр траекторий (точка подвижного равновесия ротора) сдвигается по кривой к геометрическому центру подшипника. При частоте 4000 об/мин размах траекторий вращения является максимальным в рассматриваемой частотной области. Это связано с близостью к области критических колебаний. При увеличении напряженности приложенного магнитного поля также происходит смещение ротора в центральную часть подшипника, что является следствием увеличения давления в смазочной пленке и увеличения грузоподъемности опоры. Наиболее значительным этот эффект является на частоте всплытия ротора. Для конкретной роторной системы частота всплытия в условиях нулевого магнитного поля составила 1200 об/мин. Приложенное магнитное поле с индукцией 0.3Т позволяет сместить это значение до 1000 об/мин. При магнитном поле 1Т цапфа ротора отрывается от втулки подшипника скольжения на частоте 600 об/мин.

Важным результатом моделирования является факт уменьшения размаха амплитуды колебаний ротора с ростом напряженности приложенного магнитного поля. В рассматриваемом примере данный эффект наиболее значителен в области низких частот вращения. На частоте 1000 об/мин размах уменьшился с 20 мкм при 0Т до 10 мкм при 1Т. Более подробно результаты моделирования траекторий представлены в работе [26].

Последним этапом исследований опор скольжения, смазываемых магнитореологическим смазочным материалом являлся модальный анализ. На рисунке 5 представлена зависимость собственных частот ротора от частоты вращения. Основной задачей модального анализа являлось установление возможности управления собственной частотой ротора за счет изменения приложенного магнитного поля.



а *б*

в *г*

Рис. 4. Коэффициенты демпфирования

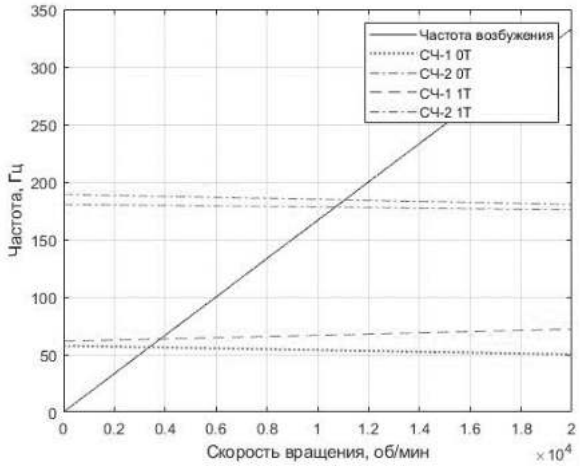


Рис. 5. Диаграмма Кэмпбелла

Как видно на рисунке 5 происходит смещение первой и второй собственной частоты вращения ротора. Основной рассматриваемой областью является частотная область около первой критической частоты. Резонанс в условиях нулевого магнитного поля наиболее вероятен на частоте 56 Гц. При индукции магнитного поля 1Т собственная частота ротора смещается до 63 Гц. Таким образом подтверждается гипотеза о возможности управления динамическими характеристиками ротора на подшипниках скольжения, смазываемых магнитореологическими жидкостями за счет изменения приложенного магнитного поля, а именно управления напряжением и силой тока на электромагнитном актуаторе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90259.

Библиографический список

1. **Seemann, W.** Stability investigations of an elastic rotor supported by actively deformed journal bearings considering the associated spectral system / A. Becker, W. Seemann // Open Arch. 17th Int. Symp. Transp. Phenom. Dyn. Rotating Mach. ISROMAC 2017. - 2017.

2. Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review / Ł. Breńkacz [et al.] // Mech. Syst. Signal Process. – 2021. - Vol. 151. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107423.

3. Advances in compact manufacturing for shape and performance controllability of large-scale components-a review / F. Qin [et al.] // Chinese J. Mech. Eng. English Ed. – 2017. - Vol. 30. - P. 7–21. doi: 10.3901/CJME.2016.1102.128.

4. **Chasalevris, A.** Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings / A. Chasalevris, F. Dohnal // Tribol. Int. – 2-16. - Vol. 104. – P. 369–382. doi: 10.1016/j.triboint.2016.06.022.

5. **Chasalevris, A.** Modal interaction and vibration suppression in industrial turbines using adjustable journal bearings / A. Chasalevris, F. Dohnal // J. Phys. Conf. Ser. – 2016. - Vol. 744. doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012156.

6. **Santos, I.F.** Compensation of cross-coupling stiffness and increase of direct damping in multirecess journal bearings using active hybrid lubrication: Part i-theory / I.F. Santos, F.Y. Watanabe // J. Tribol. – 2004. - Vol. 126. – P. 146–155. doi: 10.1115/1.1631015.

7. **Lampaert, S.G.E.** Rheological texture in a journal bearing with magnetorheological fluids / G.E. Lampaert Stefan, F. Quinci, A.J. Ron van Ostayen // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. - Vol. 499. – P.7.

8. **Lampaert, S.G.E.** Experimental results on a hydrostatic bearing lubricated with a magnetorheological fluid / S.G.E. Lampaert, R.A.J. van Ostayen // Current Applied Physics. – 2019. - Vol. 19– P. 1441–1448.

9. **Horak, W.** Measurement of normal force in magnetorheological and ferrofluid lubricated bearings / J. Salwiński, W. Horak// Key Engineering Materials. - 2012. - Vol. 490. – P. 25-32.

10. **Horak, W.** The analysis of the working conditions of a thrust squeeze bearing with a magnetorheological fluid operating in the oscillatory compression mode / W. Horak, M. Szczęch // Tribologia. – 2019. - Vol.3. – P. 45-50

11. **Hesselbach, J.** Active hydrostatic bearing with magnetorheological fluid / J. Hesselbach C. Abel-Keilhack // Journal of Applied Physics. – 2003. - Vol. 93. – P. 3. doi: 10.1063/1.1555850.

12. **Hesselbach, J.** Development of bearings and a damper based on magnetically controllable fluids / J M Guldbakke, J Hesselbach // J. Phys.: Condens. Matter. – 2006. - Vol. 18. – P.14. doi :10.1088/0953-8984/18/38/S29.

13. **Osman, T.A.** Effect of using current-carrying-wire models in the design of hydrodynamic journal bearings lubricated with ferrofluid / T.A. Osman, G.S. Nada, Z.S. Safar // Tribology Letters. – 2001. - Vol. 11. - №1. – P. 61-70.

14. **Wang, X.** Stiffness and Damping Properties of (Semi) Floating Ring Bearing Using Magnetorheological Fluids as Lubricant / X. Wang, H. Li, Wen Lu, G. Meng // Journal of Tribology. – 2017. - Vol. 139. – P. 11.

15. **Ram, P.** Ferrofluid lubrication in porous inclined slider bearing / Paras Ram // Indian Journal of Pure and Applied Mathematics. - 1999. – Vol. 30 (12). - P.1273-1281.

16. **Bompos, D.A.** Journal Bearing Stiffness and Damping Coefficients Using Nanomagnetorheological Fluids and Stability Analysis / D.A. Bompos, P.G. Nikolakopoulos // Journal of Tribology. – 2014. - Vol. 136. – P.9.

17. **Gertzos, K.P.** CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant / K.P. Gertzos, P.G. Nikolakopoulos, C.A. Papadopoulos // Tribol.Int. – 2008. - Vol.41. – P. 1190–1204

18. **Фетисов, А.С.** Расчет магнитной цепи опоры скольжения, смазываемой магнитореологическими жидкостями / А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2019. - № 3 (335). - С. 69-74.

19. Численное моделирование подшипников жидкостного трения при смазке магнитореологическими жидкостями / А.С. Фетисов, А.Ю. Бабин, М.Э. Бондаренко, В.О. Тюрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2019. - № 1 (333). - С. 93-100.

20. **Babin, A.** Numerical Modelling of Fluid-Film Bearing Lubricated with Magnetorheological Fluid / A. Babin, A. Fetisov, V. Tyurin // Lecture Notes in Mechanical Engineering. - 2020. – P. 1303–1310.

21. **Fetisov, A.** Dynamics of Flexible Rotor on Journal Bearings Lubricated with Magnetorheological Fluid / A. Fetisov, V. Tyurin. – Proceedings of II International Scientific Conference "CAMSTech-II 2021: Advances in Material Science and Technologies", Krasnoyarsk, 29-31 July 2021. – 8 p.

22. **Adams, M.L.** Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting / M.L. Adams // NY: Marcel Dekker, Inc., 2001. - 354 p.

23. **Зенкевич, О.** Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган // М.: Мир, 1986. – 318 с.

24. **Chen, W.** Introduction to dynamics of rotor – bearing systems / W. Chen, E. Gunter // Charlottesville, Eigen Technologies, 2005. – 470 p.

25. **Childs, D.** Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling, and analysis / D. Childs. – NY, John Willey&Sons, 1993. – 474 p.

26. **Фетисов, А.С.** Траектории ротора на магнитореологических опорах скольжения / А.С. Фетисов / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2021. - № 6 (350). – 6 с.

УДК 621:891 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_253

М.А. Шилов, канд. техн. наук (Вятский государственный университет, Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина), **А.В. Волков**, канд. техн. наук (Ивановская государственная медицинская академия), **М.Д. Кузьмичева** (Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина), **Н.В. Усольцева,** канд. хим. наук (Ивановский государственный университет)

МОДЕЛЬ СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ ПЛАСТИЧНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА С ПРИСАДКАМИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

Аннотация. *На основе уравнений гидродинамики смазочных слоев построена математическая модель сдвигового течения пластичного смазочного материала с присадкам углеродных наноструктур. Определены пороговые амплитуды сдвигового течения Куэтта, при которых структурируется УНС в смазочных слоях. Показано, что тензор вязких напряжений определяется параметром порядка.*

Based on the equations of hydrodynamics of lubricating layers, a mathematical model of the shear flow of a plastic lubricant with additives of carbon nanostructures is constructed. The threshold amplitudes of the Couette shear flow, at which CNS is structured in the lubricating layers, are determined. It is proved that the viscous stress tensor is determined by the order parameter.

Ключевые слова: модель, смазочный материал, сдвиговое течение, углеродные наноструктуры
Keywords: model, lubricant, shear flow, carbon nanostructures

Введение

Интерес к исследованиям пластичных смазочных материалов с углеродными наноструктурами (УНС) обусловлен высокой чувствительностью ориентации молекул УНС к механическим воздействиям (осциллирующие гидродинамические потоки). Даже слабое

воздействие меняет начальную ориентацию молекул УНС, и молекулы отклоняются периодически от равновесного положения. Как было показано, в случае холестерических и сегнетоэлектрических пластичных материалов углеродные нанотрубки ориентируются вдоль мезогенных молекул [1, 2]. В случае немезогенных пластичных смазочных материалов повышение интенсивности воздействия приводит к образованию деформаций смазочного слоя (СС), когда молекулы колеблются около нового равновесного положения, периодически меняющегося вдоль слоя. Образование периодически упорядоченных структур при сдвиге зависит от начальной ориентации молекул УНС в смазочном слое, вида движения граничной пластины, условий ориентации молекул УНС на границе [3]. Появление частично упорядоченной деформированной структуры в СС под действием гидродинамических потоков теоретически анализируется во многих работах, однако эти исследования не охватывают всех особенностей упорядочения структуры смазочного слоя. Отметим, до настоящего времени не выяснен механизм потери устойчивости гомеотропной структуры в течении Куэтта на низких частотах.

В связи с выше изложенным целью работы является построение модели сдвигового течения в смазочном слое с присадками углеродных наноструктур.

Постановка задачи

В качестве модельного эксперимента использовали две параллельные стеклянные пластины (Рис. 1). Между ними находится слой смазочного материала, высота которого фиксирована (H). Положим, что длина смазочного слоя (L) много больше его толщины. Граничными эффектами вблизи границ ячейки пренебрегаем. Введем декартову систему координат таким образом, как показано на рис. 1. Ось y направлена перпендикулярно течению, а ось x параллельно. Рассматривая плоское течение (движение смазки и вращательное движение углеродных наноструктур происходит в плоскости $x0y$) считаем независимость всех переменных от координаты z.

Сдвиг нижней пластины осуществляли, задав возвратно-поступательное движение с угловой частотой ω. Верхняя пластина неподвижна. Для данной трибосистемы запишем граничные условия:

1. Скорость сдвига нижней пластины в направлении оси x изменяется по гармоническому закону: $v_x = v_0 sin\omega t$;
2. Скорость сдавливания в направлении оси y не изменяется: $v_y = 0$. Здесь v_0 – амплитуда скорости сдвига, м/с; t – время, с.

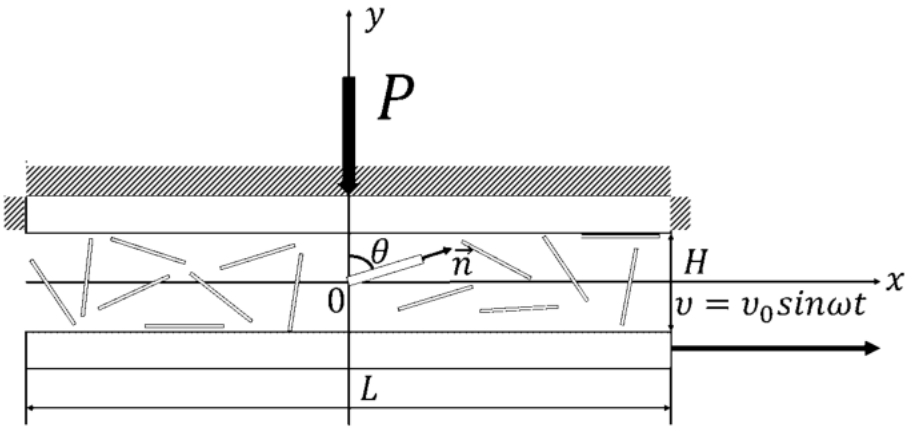


Рис. 1. Схема сдвигового течения смазочного материала

Методы решения

Положим, что на границах трибослоя задана жесткая ориентация УНС, поэтому граничные условия, накладываемые на угол первоначальной ориентации УНС следующие: на верхней и нижней границах у пластины ориентация УНС планарная, т.е. расположение параллельно оси x ($\theta(H/2) = \theta(-H/2) = 0$).

Для оценки поведения УНС в смазочном слое запишем основные уравнения гидродинамики и уравнение движения параметра порядка:
Уравнение неразрывности (массового баланса):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{v} = 0, \tag{1}$$

Уравнение движения (баланса импульса):

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \times \vec{v}) + \nabla p - \nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} = 0, \tag{2}$$

Закон сохранения внутреннего момента:

$$\vec{S} \times \left(I \frac{d\vec{\omega}}{dt} \right) + \vec{\mathrm{F}}_{el} + \vec{\mathrm{F}}_{diss} = 0, \tag{3}$$

где ρ – плотность смазочного материала;

$\vec{v}$ – вектор скорости течения;

$\rho \vec{v} \times \vec{v}$ – напряжения среды, вызванные конвекцией;

$\underline{\underline{\sigma}}$ – тензор вязких напряжений;

p – гидростатическое давление;

$\vec{S}$ – параметр порядка;

$\dot{\vec{S}}$ – скорость изменения параметра порядка;

I – момент инерции УНС в единице объема смазочного материала, вычисленные относительно угловой скорости вращения параметра порядка;

$\vec{\omega}$ - угловая скорость вращения параметра порядка ($\vec{\omega} = \dot{\vec{S}} \times \vec{S}$);

$\vec{\mathrm{F}}_{el}$ – сила упругости, зависящая от $\vec{S}$;

$\vec{\mathrm{F}}_{diss}$ – сила диссипации, зависящая от $\vec{S}$.

С целью полного описания процессов, протекающих в смазочном слое, необходимо учитывать энергетические соотношения в среде. Функция, отвечающая за диссипацию энергии, согласно [4] будет иметь вид:

$$f = \underline{\underline{\sigma}}\, \underline{\underline{\upsilon}} + \vec{\mathrm{F}}_{diss} \cdot \vec{\Omega}, \tag{4}$$

где $\underline{\underline{\upsilon}} = \upsilon_{ij} = (\upsilon_{i,j} + \upsilon_{j,i})/2$ определяет тензор скоростей деформации, а $\vec{\Omega} = \dot{\vec{S}} - 1/2(rot\, \vec{v} \times \vec{S})$ – вращательная скорость параметра порядка относительно среды. Для линейного случая тензор напряжений и силу диссипации представляют в форме линейной комбинации тензора скоростей деформаций и вращательной скорости параметра порядка. Поскольку в модели УНС со средой не взаимодействует, то направление параметра порядка равнозначно относительно направления горизонтальной оси, т.е. $\vec{S} = -\vec{S}$. Тогда выражения для тензора вязких напряжений и силы диссипации будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\sigma}} = \left(\mu_1 \upsilon_{\alpha\alpha} + \mu_2 S_\alpha S_\beta \upsilon_{\alpha\beta}\right)\delta_{ij} + \mu_3 \upsilon_{\alpha\alpha} S_i S_j + \alpha_1 \upsilon_{\alpha\beta} S_\alpha S_\beta S_i S_j + \alpha_2 \Omega_i S_j + \alpha_3 \Omega_j S_i + \\ + \alpha_4 \upsilon_{ij} + \alpha_5 \upsilon_{ik} S_k S_j + \alpha_6 \upsilon_{jk} S_k S_j, \end{aligned} \tag{5}$$

$$\vec{\mathrm{F}}_{diss} = \eta_1 \vec{\Omega} + \eta_2 \left[\underline{\underline{\upsilon}} \cdot \vec{S} - \left(\vec{S} \cdot \underline{\underline{\upsilon}} \cdot \vec{S} \right) \vec{S} \right], \tag{6}$$

где $\mu_k (k = 1..3)$ – коэффициенты объемной вязкости,

$\alpha_k (k = 1..6)$ – коэффициенты вязкости Лесли,

η_1 и η_2 – коэффициенты вращательной вязкости,

$\underline{\underline{\upsilon}} \cdot \vec{S}$ – результат свертки тензора скорости деформации $\underline{\underline{\upsilon}}$ и вектора параметра порядка $\vec{S}$.

В силу зависимости между коэффициентами вязкости (условия Онсагера [4]) и зависимостями внутренних моментов с антисимметричной частью тензора вязки напряжений:

$$\eta_1 = \alpha_3 - \alpha_2, \quad \eta_2 = \alpha_2 + \alpha_3 = \alpha_6 - \alpha_5. \tag{7}$$

Сила упругости $\vec{\mathrm{F}}_{el}$ определяется нахождением интеграла свободной энергии:

$$E = E_0 + \int_V F dV, \tag{8}$$

где E_0 – энергия смазочного слоя в отсутствии деформации,

F – плотность упругой энергии Франка:

$$F = \frac{1}{2}\left[K_{11}\left(div\,\vec{S}\right)^2 + K_{22}(\vec{S}\cdot rot\,\vec{S})^2 + K_{33}(\vec{S}\times rot\,\vec{S})^2\right], \tag{9}$$

где K_{11}, K_{22}, K_{33} – постоянные Франка [5].

Следует отметить, что представленные выше уравнения полностью описывают гидродинамический смазочный слой.

Вернемся к описанию сдвигового течения в смазочном слое, представленного на рис. 1. Смазочный слой рассмотрим как несжимаемый и положим равными нулю малые коэффициенты вязкости α_3 и α_1, поскольку $|\alpha_1|/|\alpha_4| \sim |\alpha_3|/|\alpha_2| \sim 10^{-2}$. Исходя из этих положений $\eta_2 = -\eta_2 = \alpha_6 - \alpha_5 = \eta$. Поэтому система уравнений (1) – (3) будет иметь вид:

$$\begin{gathered} \eta\left[\vec{\Omega} - \underline{\underline{\upsilon}}\cdot\vec{S} + \left(\underline{\underline{\upsilon}}\cdot\vec{S}\cdot\vec{S}\right)\vec{S}\right] - \left[\vec{\mathrm{F}}_{diss} - \left(\vec{\mathrm{F}}_{diss}\cdot\vec{S}\right)\vec{S}\right] = 0, \\ \rho\dot{\vec{\upsilon}} = -\nabla p + \nabla\cdot\underline{\underline{\sigma}}, \\ div\,\vec{\upsilon} = 0. \end{gathered} \tag{10}$$

Преобразование тензора вязких напряжений с учетом допущений:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \alpha_4\upsilon_{ij} + \alpha_2\Omega_i S_j + \alpha_5\upsilon_{ik}S_k S_j + \alpha_6\upsilon_{jk}S_k S_j, \tag{11}$$

Для упрощения расчета положим $K_{11} = K_{22} = K_{33}$. В этом случае плотность упругой энергии Франка представим выражением:

$$F = \frac{1}{2}K_{33}\sum_i (\nabla S_i)^2, i = x, y, z \tag{12}$$

Поскольку деформация смазочного слоя происходит в плоскости xz, то все компоненты в уравнении (10), связанные с y составляющей будут тождественно равны нулю. Проекции параметра порядка на оси x и z будут зависеть от угла наклона УНС относительно системы координат ($S_x = sin\theta,\ S_z = cos\theta$). Рассмотрим уравнения вращения системы для компоненты Ω_x. Преобразовав его к виду:

$$\eta\left[\dot{\theta} - \upsilon_{z,x}sin^2\theta - \upsilon_{x,z}cos^2\theta - \upsilon_{x,x}sin2\theta\right] = K_{33}\Delta\theta. \tag{13}$$

дважды применив операцию ротор и условие несжимаемости жидкости, исключим из уравнения составляющую скорости относительно оси z. Уравнение для υ_x будет

$$-\rho\Delta\upsilon_{x,T} + \rho(\upsilon_x\Delta\upsilon_z - \upsilon_z\Delta\upsilon_x)_{,z} = \partial_z\left[(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})_{,xz} + \sigma_{zx,xx} - \sigma_{xz,xx}\right]. \tag{14}$$

Выражение для тензора вязких напряжений преобразуем с учетом выражения скорости вращения параметра порядка, тогда с учетом вязкости оно будет иметь вид:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \alpha_4\upsilon_{ij} + \alpha_6\left(\upsilon_{i\alpha}S_\alpha S_j + \upsilon_{j\alpha}S_\alpha S_i\right) + \eta\upsilon_{\alpha\beta}S_\alpha S_\beta S_i S_j + \mathrm{F}_{el_\alpha}S_\alpha S_i S_j - \mathrm{F}_{el_\alpha}S_j, \tag{15}$$

Подставив выражение (15) в уравнение (14) и преобразовав, получим

$$\begin{gathered} -\rho\Delta\upsilon_{x,T} + \rho(\upsilon_x\Delta\upsilon_z - \upsilon_z\Delta\upsilon_x)_{,z} - K_{33}\partial_z[\partial_{xz}^2(2\Delta\theta sin\theta cos\theta) + \partial_z^2 sin^2\theta + \partial_x^2 cos^2\theta] = \\ \partial_z\begin{bmatrix}\partial_{xz}^2(-2(\alpha_4+\alpha_6)\upsilon_{xx} - \eta\upsilon_{xx}(cos^2\theta - sin^2\theta) + 2\eta\upsilon_{xx}sin\theta cos\theta(cos^2\theta - sin^2\theta)) + \\ (\partial_x^2 - \partial_z^2)\,(\alpha_4+\alpha_6)\upsilon_{xz} - \eta\upsilon_{xx}sin\theta cos\theta(cos^2\theta - sin^2\theta) + 2\eta\upsilon_{xz}cos^2\theta sin^2\theta\end{bmatrix} \end{gathered} \tag{16}$$

Обезразмерим уравнения (13) и (16) и условие несжимаемости (10). Для этого используем толщину слоя h и частоту осцилляций нижней пластины ω. Введем безразмерные параметры $X = x/h,\ \ Z = z/h,\ \ t = T\omega$ и $V_k = v_k/(\omega h)$, тогда уравнения (13), (16) и условие несжимаемости уравнений (10) будут иметь вид

$$\begin{gathered}\partial_t\theta + \theta_{,x}v_x + \theta_{,z}v_z - a\Delta\theta - v_{x,z}cos^2\theta + v_{z,x}sin^2\theta - 2v_{xx}sin\theta cos\theta = 0,\\ \left(\eta^*\sigma^2\Delta\partial_t - \widehat{H}\right)v_x + a\partial_z[\partial_{xz}^2(2\Delta\theta sin\theta cos\theta) + \partial_z^2(\Delta\theta sin^2\theta) + \partial_x^2(\Delta\theta cos^2\theta)] =\\ \partial_z(\partial_x^2 - \partial_z^2)(2v_{xz}sin^2\theta cos^2\theta) - \partial_x\partial_z^2 2v_{xz}sin\theta cos\theta(cos^2\theta - sin^2\theta) -\\ \partial_z(\partial_x^2 - \partial_z^2)(v_{xx}sin\theta cos\theta(cos^2\theta - sin^2\theta)) - \partial_x\partial_z^2(4v_{xx}sin^2\theta cos^2\theta) +\\ \eta^*\sigma^2(v_x\Delta v_z - v_z\Delta v_x),\\ div\,\vec{v} = 0.\end{gathered} \tag{17}$$

В этих уравнениях введены следующие обозначения: $\widehat{H} = \eta^*\Delta^2 + \partial_z^2\partial_x^2$ – оператор дифференцирования; a и σ – безразмерные параметры, определяющие зависимость структурирования от толщины смазочного слоя h и частоты сдвига ω через параметр скейлинга $h^2\omega$:

$$a = \frac{K_{33}}{\eta h^2\omega} = \frac{1}{\omega\tau},\ \ \sigma^2 = \frac{\rho h^2\omega}{\eta\eta^*} = \gamma\omega\tau,\quad \gamma = \frac{\rho K_{33}}{\eta^2\eta^*}\sim 10^{-6},\ \ \eta^* = \frac{\alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_2}{\eta}. \tag{18}$$

Здесь η^* - безразмерная вязкость в вязкой волне, распространяющейся вдоль направления сдвига,

$\tau = \eta h^2/K_{33}$ – характерное время восстановления гомеотропной структуры УНС в смазочном материале при снятии внешнего воздействия. Если ориентацию молекул на границе считать жесткой и учитывать условие прилипания жидкости, то граничные условия будут иметь вид:

$$\begin{gathered}v_x|_{z=\frac{1}{2}} = 0,\\ v_x|_{z=-\frac{1}{2}} = u_0 cost,\\ v_z|_{z=\pm\frac{1}{2}} = 0,\\ \theta|_{z=\pm\frac{1}{2}} = 0.\end{gathered} \tag{19}$$

Выводы

Разработана модель сдвигового течения пластичного смазочного материала с присадками углеродных наноструктур. Структура уравнений (18) представляет зависимость порогового значения амплитуды от частоты и толщины смазочного слоя через параметр скейлинга при условии жесткой ориентации.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-29-19150_мк

Библиографический список

1. Dispersion of carbon nanotubes in cholesteric liquid crystals / L.N. Lisetski [et al.] // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2009. Vol. 509. Iss. I. P. 43(1177)-50(1184).

2. Dispersions of multiwall carbon nanotubes in ferroelectric liquid crystals / M. Yakemseva [et al.] // European Physical Journal E. Soft Matter. 2014. Vol. 37. Iss. 2. № 7. 7 p. DOI 10.1140/epje/i2014-14007-4.

3. Orientation ordering of boundary layers and lubricity of oils. / I.A. Buyanovskii [et al.] // J. Frict. Wear. 2008. Vol. 29. P. 282–287.

4. **Stephen, M.J** Physics of liquid crystals / M.J. Stephen, J.P. Straley // Reviews of Modern Physics. 1974. V. 46. P. 617-703.

5. **Сонин, А. С.** Введение в физику жидких кристаллов / А.С. Сонин **//** М.: Наука, 1983. - 320 с.

СЕКЦИЯ 4.
Механика контактного взаимодействия

УДК 620.179.112 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_258

М.А. Буракова, канд. техн. наук, **В.В. Шаповалов,** д-р техн. наук, **Э.Э. Фейзов,** канд. техн. наук, **В.Б. Мищиненко, Р.А. Корниенко** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

МОДЕЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. *Современные нелинейные технические системы не обходятся без использования таких узлов трения, как различные передачи и соединения, а также сложные узлы и устройства. Проведена оптимизация геометрических параметров системы «железнодорожный путь – подвижной состав» при движении в кривых малого радиуса. Для проведения модельных испытаний с применением метода физико-математического моделирования использован уникальный катковый стенд. Предложен способ повышения эффективности фрикционных систем, который основан на фундаментальных исследованиях в области механики контактного фрикционного взаимодействия твердых тел. Теоретической базой данной технологии является анизотропия фрикционных связей, формируемых путём термометаллопракирования рабочих поверхностей колёс.*

Modern nonlinear technical systems cannot do without the use of friction units such as various transmissions and connections, as well as complex components and devices. Optimization of geometrical parameters of the system "railway track - rolling stock" when moving in curves of small radius is carried out. A unique roller stand was used to conduct model tests using the method of physical and mathematical modeling. A method for increasing the efficiency of friction systems is proposed, which is based on fundamental research in the field of mechanics of contact friction interaction of solids. The theoretical basis of this technology is the anisotropy of friction bonds formed by thermometallopracting of the working surfaces of the wheels.

Ключевые слова: технические системы, узлы трения, оптимизация, физико-математическое моделирование.
Keywords: technical systems, friction units, optimization, physical and mathematical modeling.

Все современные технические системы не обходятся без использования узлов трения, таких как зубчатые, червячные, фрикционные, ременные, цепные передачи, подшипники качения и скольжения, различные соединения, а также такие сложные узлы как фрикционные гасители, тормозные устройства и т. д. [1…8]. Несмотря на то, что эти узлы трения составляют около 8% от общего веса технической системы, они в значительной степени определяют их основные технико-экономические характеристики. В свою очередь, выходные параметры трибосопряжений, такие как коэффициент трения и его стабильность, износ рабочих поверхностей и его интенсивность и ряд других, сложно и нелинейно зависят от более сорока взаимосвязанных параметров и факторов. К ним относятся: температура контактирующих тел и ее градиенты, а также температурные поля, которые возникают в тонком трибослое от действия нормальных и тангенциальных механических напряжений в контактирующих материалах и от градиентов их фактических площадей касания, от коэффициентов взаимного перекрытия, а также от скоростей относительного скольжения и качения, от типа движения, от среды, в которой работает трибосопряжение, от природы контактирующих и смазочных материалов, микро- и макрогеометрии контактирующих поверхностей, от характера плёнки

имеющейся на поверхностях трения, конструктивных особенностей узлов трения, динамических характеристик квазилинейных механических подсистем, включающих узлы трения, а также трибоспектральных характеристик их фрикционного взаимодействия и ряда других факторов [1, 3, 4, 7, 8].

Наиболее эффективным подходом для исследования нелинейных фрикционных систем является метод физико-математического моделирования. Этот метод базируется на построении математической модели квазилинейной подсистемы машины или механизма в виде эквивалентной динамической модели, реализованной в выбранном масштабе или масштабах в случае применения *n*-вариантного моделирования [2, 5, 6]. В дальнейшем к данной модели (моделям) присоединяется модель (модели) фрикционного узла. При этом обеспечивается заданный уровень коэффициентов корреляции основных динамических характеристик натурной и модельной квазилинейных подсистем и трибоспектральных характеристик натурной и модельной фрикционных подсистем.

Данный подход был применен при решении ряда задач по оптимизации нелинейных технических систем, на примере некоторых путевых и дорожных машин. Проведена оптимизация геометрических параметров системы «железнодорожный путь – подвижной состав» в кривых малого радиуса. Для проведения модельных испытаний с применением метода физико-математического моделирования использован уникальный катковый стенд, позволяющий моделировать взаимодействие железнодорожного пути с подвижным составом (рис. 1). Использование данного стенда позволило значительно сократить сроки выполнения исследований, а также разработать рекомендации по оптимизации геометрии рельсовой колеи (пат. № 2343450) и получить экономический эффект по сети железных дорог в пределах 3 млрд. руб.

Авторами предложен способ повышения эффективности фрикционных систем (пат. № 2674899), основанный на фундаментальных исследованиях в области механики контактного фрикционного взаимодействия твердых тел. Техническим решением является разработка технологии и технологического оборудования для повышения тягового усилия локомотива и увеличения ресурса работы колесных пар. Теоретическая база данной технологии представдлена анизотропией фрикционных связей, формируемых путём термометаллопракирования рабочих поверхностей колёс локомотивов [8]. Для проведения экспериментальных исследований модельной системы «подвижной состав – путь» использован катковый стенд (см. рис. 1), который является копией ходовой части с соблюдением жесткостных и инерционных свойств, распределения массы по осям колёсных пар.

Рис. 1. Катковый стенд для моделирования подсистемы «путь – подвижной состав»

Для эффективной оптимизации упруго – диссипативных связей и получения корректных результатов проведён физический эксперимент на катковом стенде для моделирования подсистемы «путь – подвижной состав», созданной на базе теоретических положений физико – математического моделирования (пат. № 2343450) (рис. 2).

а) б)

Рис. 2. Исследования на катковом стенде модели контакта колеса с рельсом: *а)* без смазки; *б)* с переносом смазочного материала с колеса на рельс

Так как все испытания должны проводиться в реальном масштабе времени $C_t = 1$, то необходимым условием является изготовление модели из такого же материала, что и реальные поверхности трения, при этом временные интервалы релаксации связей фрикционного контакта в реальных и модельных условиях должны быть равны друг другу.

Аналогичные условия равенства можно получить и рассматривая трех-, четырех-, *n*-массные системы, то есть принятое условие обеспечивает динамическое подобие модели и объекта механических систем для любой *n*-массной системы [2, 5, 6].

При движении подвижного состава по прямой на величины сил тяги и сил сопротивления наибольшее влияние оказывает вертикальная и продольная динамика, тогда как при движении в кривом участке пути – горизонтальная, поперечная и в меньшей степени вертикальная. Поэтому, при исследовании взаимодействия колеса с рельсом необходимо различать два основных вида гребневого контакта (рис. 3). Двухточечный контакт (рис. 3, а) вызывает изнашивание при проявлении действия боковых сил на гребне и поперечного проскальзывания, также данный контакт ограничивает величину разницы диаметров качения и способность к самоустановке тележек. Одноточечный контакт (рис. 3, б), наносит наибольшие повреждения колесу и рельсу из-за высоких контактных напряжений при интенсивном проскальзывании, вызывая усталостные повреждения рельса (на выкружке).

Когда колесная пара перемещается по кривой, при определенном угле набегания, колесо может контактировать с рельсом в двух различных точках. Двухточечный контакт (см. рис. 3, а) приводит к образованию двух площадок контакта на поверхности катания рельса и на боковой поверхности головки рельса в районе выкружки. В зоне касания гребня колеса и рабочей грани головки наружного рельса уровень расчетных контактных напряжений может достигать 3000 МПа.

Для проведения исследований влияния общей динамики подвижного состава, таких как колебания, подпрыгивания, галопирования, виляния, боковая качка, на работоспособность фрикционной системы «колесо – рельс» разработана физическая модель подсистемы «колесо – рельс» и определены основные факторы, влияющие на её работоспособность. Также созданы

критерии физического подобия подсистемы с минимальным количеством факторов, что позволило получить математическую модель подсистемы «колесо – рельс» и установить оптимальные соотношения физических параметров, влияющих на сопротивление движению подвижного состава в криволинейных участках пути.

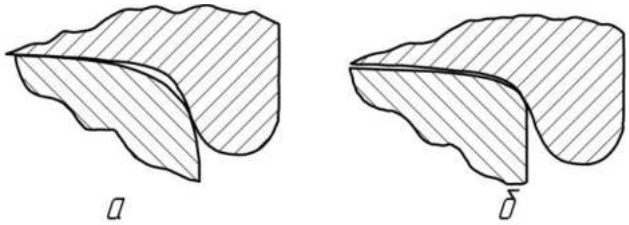


Рис. 3. Основные виды гребневого контакта: *а)* двухточечный; *б)* одноточечный

В результате фрикционного взаимодействия двух поверхностей трения, изменяются величины амплитуд сближения в нормальном и тангенциальном направлениях, что вызывает в точках соприкосновения активных микрообъёмов двух поверхностей силы трения. Кинетическая энергия системы, расходуемая на преодоление сил трения, преобразуется в тепловую. В точках фактической площади касания реализуется максимальная температура «вспышки», которая пропорциональна величинам, как фактической площади касания, так и силы трения и скорости скольжения.

Таким образом, идентичность динамических характеристик механической системы и фрикционного контакта исследуемого объекта и его модели является одним из главных условий для обеспечения идентичности триботехнических и трибоспектральных характеристик фрикционного взаимодействия. Движение нелинейных технических систем, как реального объекта, так и модели, описывается одними и теми же системами уравнений, также для них должны быть равны частоты и формы колебаний. Адекватность динамических характеристик механических систем и подсистем фрикционного контакта реального объекта и модели должна обеспечиваться условиями равенства величин деформаций связей трибосопряжений и их макро- и микронеровностей.

Так как колёсные пары задают динамические нагрузки на все элементы подвижного состава и пути, то динамические характеристики подвижного состава можно исследовать только в системе «подвижной состав – верхнее строение пути», поэтому изучение физических моделей подвижного состава необходимо проводить на испытательных комплексах, адекватно отражающих динамику всей трибосистемы. Следовательно, технический прогресс невозможен без новых инновационных разработок, открытий и изобретений.

Библиографический список

1. Optimization of dynamically loaded nonlinear technical systems / V.V. Shapovalov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1029 (2021), 1, 12043.

2. Physical and mathematic N-option modeling and optimization of dynamically loaded nonlinear technical systems / I.V. Kolesnikov [et al.] / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1029 (2021), 1, 12033.

3. **Migal, Yu.F.** Computer simulation of TiAlN coatings and its analogues on iron surface / Yu.F. Migal, V.I. Kolesnikov, D.N. Shishiyanu / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1029 (2021,) 1, 12057.

4. Diagnostics of dissipative characteristics of friction damper / S.L. Chernyshev [et al.] / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 996 (2020), 1, 12009.

5. Technologies for Improving the Wear Resistance of Heavily Loaded Tribosystems and Their Monitoring / V.I. Kolesnikov [et al.] / Journal of Friction and Wear. 2020. Vol. 41. № 2. pp. 169-173.

6. Monitoring of Nonlinear Antifrictional Systems / V.V. Shapovalov [et al.] // International Journal jf Appiied Engineering Research ISSN 0973-4562. Vol. 12, Number 21, (2017), pp. 10902-10908.

7. Formation of Surface Structures under Friction in Synthetic Oils / A.V. Sidashov [et al.] / Journal of Friction and Wear. 2020. Voi. 41. № 5, pp. 417 - 420.

8. Metal cladding of friction surfaces in liquid media / V.V. Shapovalov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 996 (2020), 012022. DOI:10.1088/1757-899X/996/1/012022.

УДК 532.5.011.18 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_262

К.В. Гаврилов, д-р техн. наук, **А.А. Дойкин,** канд техн. наук, **Ю.В. Рождественский,** д-р техн. наук (Южно-Уральский государственный университет)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОТЕКСТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ «ПОРШЕНЬ-ЦИЛИНДР» ДИЗЕЛЯ*

Аннотация. *В статье выполнен обзор основных видов микропрофилирования поверхностей трения трибосопряжения (ТС) «поршень-цилиндр». Создана расчетная модель и разработана программа расчетного анализа ТС. Выполнены расчеты гидромеханических характеристик ТС для различных видов микрогеометрии.*

The article provides an overview of the friction surfaces microprofiling main types of the «piston-cylinder» tribounit. The calculation model is created and the program of the tribounit calculation analysis is developed. Calculations of the tribounit hydro-mechanical characteristics for different types of microgeometry are performed.

Ключевые слова: износ; микрогеометрия; режимы трения трибосопряжений; поршень-цилиндр.
Key words: wear; microgeometry; friction modes of tribounit; piston-cylinder.

На новом этапе развития трибологии процессы трения и изнашивания представляются сложными процессами физико-химической механики, и описать их без определенных упрощений, не представляется возможным. В связи с этим, большое распространение получают различные модели, среди которых выделяются два направления: математическое описание микрорельефа поверхностей трения и модельное представление их контактного взаимодействия [1-6].

Взаимодействие шероховатых поверхностей, а также поверхностей с технологически заданным микрорельефом поверхности определяет многие процессы в электротехнике, теплотехнике, машиностроении, автомобильной промышленности, двигателестроении и других отраслях.

Микропрофилирование предназначено для уменьшения трения в трибосопряжениях, повышения их несущей способности, снижения износа, повышения надежности и экономичности узлов трения. Так, к основным видам микропрофилирования в сопряжении «поршень-цилиндр», относят хонингование и текстурирование.

В данной работе рассматриваются некоторые виды регулярной микрогеометрии поверхностей трения (микроканавки) ТС «поршень-цилиндр» двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и их влияние на основные гидромеханические характеристики (ГМХ): $inf\ h_{min}$ – минимальная толщина смазочного слоя,

* Работа поддержана РФФИ-Челябинская область, проект № 20-48-740030

$sup\, p_{max}$ – максимальное ГД- давление,

Q^* – средний расход смазки,

h^*_{min}– средняя толщина смазочного слоя,

p^*_{max} – среднее ГД – давление,

N^*_{mp} – средняя мощность потерь на трение.

В качестве параметров микроканавок задавались их глубина ($h_к$), расстояние между ними ($b_к$), а также угол наклона относительно вертикальной оси поршня ($\alpha_к$), что позволяет моделировать хонингование поверхности трения.

Поле гидродинамических (ГД) давлений определялось из уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial\varphi}\left[\frac{h^3}{12\bar{\mu}^*_E}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\varphi}\right]+\frac{1}{a^2}\frac{\partial}{\partial\bar{z}}\left[\frac{h^3}{12\bar{\mu}^*_E}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{z}}\right]=\frac{\bar{w}_{21}}{2}\frac{\partial\bar{h}}{\partial\bar{z}}+\frac{\partial\bar{h}}{\partial\tau}, \qquad (1)$$

где, $\bar{p}=p\psi^2/\mu_0\omega_0$ – безразмерное давление в смазочном слое,

$\psi=h_0/R$ – относительная характерная толщина смазочного слоя;

$\bar{h}=h/h_0\,; h=h_0+h_k-e\cdot\cos\varphi+Z\cdot\mathrm{tg}\,\gamma\cdot\cos\varphi;\ \bar{\mu}^*_E=\frac{\bar{\mu}^*_E}{\mu_0}$;

$-a\le\bar{z}\le a;\ \bar{z}=z/R;\ \varphi=xR;\ a=B/2R;$

$\bar{w}_{21}=(w_2-w_1)/\omega_0 R;$

$\tau,\ \bar{h},\ \bar{\mu}^*_E$ – безразмерные время, толщина смазочного слоя и эффективная вязкость смазки, соответствующая температуре T^*_E;

B, R – высота и радиус юбки поршня;

$\mu_0\,, h_0\,, \omega_0$ – вязкость смазки, толщина смазочного слоя при центральном положении шипа и частота вращения вала;

$w_1\,, w_2$ – скорости поступательного движения подвижных элементов;

$\bar{w}_{21}$ – безразмерная поступательная скорость движения поршня;

e_c – смещение центра масс поршня от оси цилиндра;

γ – угол наклона поршня;

φ – окружная координата.

При расчете траектории движения поршня на смазочном слое в цилиндре ДВС (рисунок 1) систему координат закрепляли на неподвижном цилиндре, начало подвижной системы координат размещалось в центре масс поршня. На рисунке обозначено: $P_Г$ - сила давления газов; P^j_x, P^j_z - проекции силы инерции P^j поступательно движущегося поршня (приложена в центре *C*); e_c – смещение центра масс поршня; $e_п$ – дезаксаж поршня; e_o – дезаксаж двигателя; R_x, R_y – проекции реакции смазочного слоя.

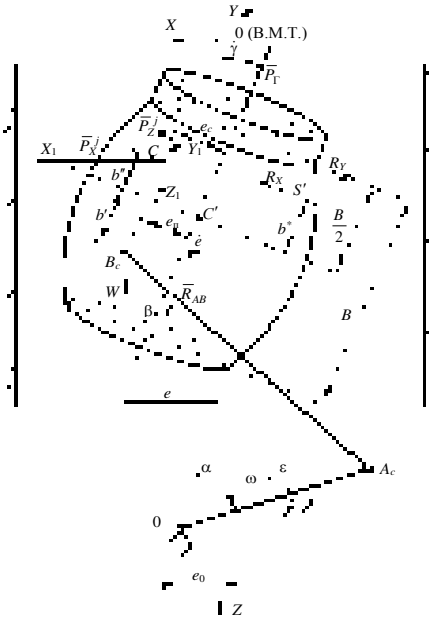


Рис. 1. Динамика поршня на смазочном слое в цилиндре дизеля

Сложные перемещения поршня состоят из поступательных движений его вдоль и поперек оси цилиндра (соответственно со скоростями $w = w_2$ и e), а также из вращательного движения вокруг оси поршневого пальца со скоростью γ. Силы тяжести и силы трения ввиду их малости не рассматривались. Таким образом, поршень имеет возможность перемещаться в общем случае в плоскостях *XOZ*, *YOZ*. Ускорение точки *C* вдоль оси *OZ* принималось равным ускорению поступательного движения поршня, определенного в кинематике плоскопараллельного движения кривошипно-шатунного механизма [7].

Сила R_{AB} считалась заданной силой, находящейся в плоскости, параллельной плоскости *XOZ*, цилиндр неподвижен ($w_1 = 0$).

Для расчетного анализа рассматриваемого гидродинамического трибосопряжения ДВС с учетом описанной методики разработана программа трибологического анализа «МИКРОГЕОМЕТРИЯ ТРИБОСИСТЕМЫ ПОРШЕНЬ-ЦИЛИНДР» [8], где в качестве исходных данных наряду с индикаторной диаграммой рабочего процесса в цилиндре и макрогеометрическими параметрами выступают параметры регулярной микрогеометрии, в виде радиальных микроканавок, перекрестной микрогеометрии с различными углами наклона, а также синусоидальной микрогеометрии.

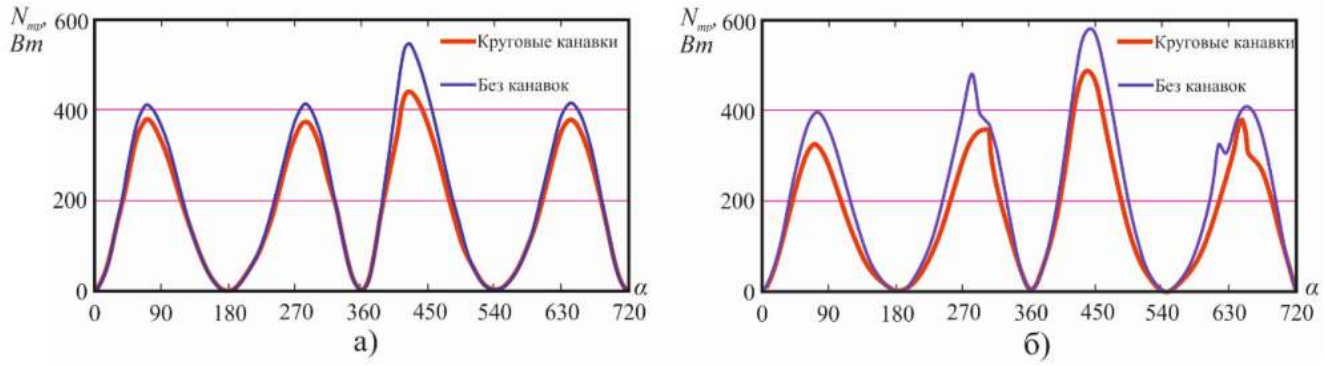


Рис. 2. (а) и (б) Потери на трение по углу поворота коленчатого вала (п.к.в.)
а) результаты работы [9], *б)* разработанная методика

С использованием разработанной программы были выполнены сравнительные расчётные исследования, и на рисунке 2 (а) и (б) показаны результаты расчёта потерь на трение в трибосопряжении в сравнении с работой [9]. Получено хорошее качественное совпадение результатов.

В таблице 1 представлены расчеты ГМХ на примере дизеля ЧН 13/15.

Результаты свидетельствуют о снижении расчетных потерь на трение в ТС с регулярной микрогеометрией до 20% при некритичном изменении других ГМХ.

Таблица 1

Результаты расчета ГМХ

Виды микрогеометрии	$inf\ h_{min}$, *мкм*	$sup\ p_{max}$, *МПа*	h^*_{min}, *мкм*	p^*_{max}, *МПа*	Q^*, *л/с*	$N^*_{тр}$, *Вт*
Без микрогеометрии	5,62	7,86	19,99	1,63	0,00169	298,99
Круговая микрогеометрия	4,84	10,51	18,92	2,05	0,00178	262,15
Перекрестная микрогеометрия	4,16	13,80	18,02	2,58	0,00186	236,09

В качестве примера на рисунках 3 (а) и (б) представлены эпюры гидродинамических давлений в смазочном слое для гладкой и текстурированной юбки поршня (радиальные микроканавки).

Из рисунка виден положительный эффект регулярной микрогеометрии поверхности направляющей поршня, заключающийся в снижении ГД-давлений в смазочном слое для угла поворота коленчатого вала, соответствующего наибольшей нагрузке ($\alpha = 390$ град. п. к. в.).

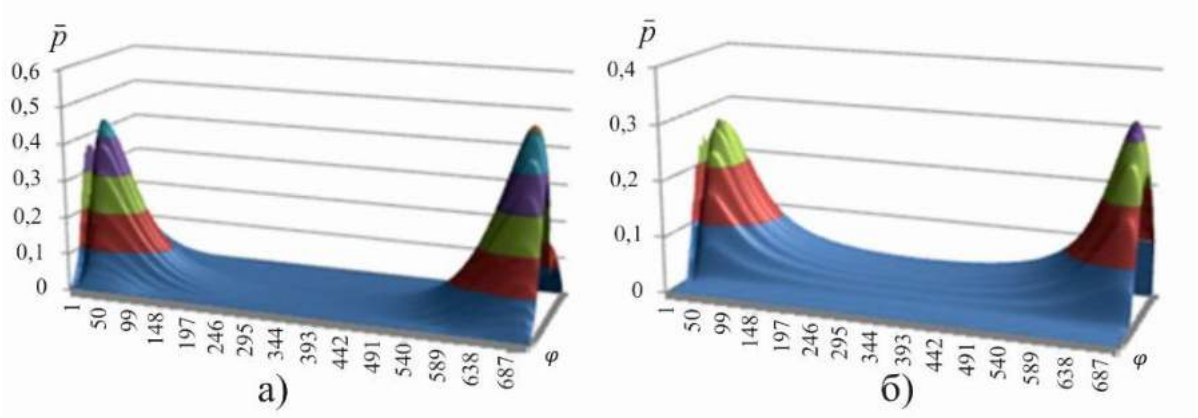


Рис. 3 (а) и (б). ГД давления в смазочном слое для $\alpha = 390$ град. п.к.в
а) без текстурирования, *б)* радиальные микроканавки

Заключение

Создана математическая модель и разработана программа расчетного анализа ТС, с помощью которой выполнено исследование влияния различных видов регулярной микрогеометрии на основные ГМХ ТС «поршень-цилиндр». Показан её положительный эффект, заключающийся в снижении потерь на трение, являющихся одним из основных показателей работоспособности конструкции.

Библиографический список

1. **Тигетов, Д.Г.** Разработка и исследование вероятностных моделей взаимодействия шероховатых поверхностей в процессе трения / Д.Г. Тигетов, Ю.А. Горицкий // М.: МЭИ, 2010. – 227 с.

2. **Иззатуллоев, М.А.** Обзор моделей микро – и макронеровностей поверхностей трения трибосопряжений / М.А. Иззатуллоев, К.В. Гаврилов, А.С. Гордиенко // В сборнике: Научный поиск Материалы девятой научной конференции аспирантов и докторантов. Министерство образования и науки Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет. 2017. С. 33-40.

3. Numerical Model for Estimation of Service Life of Tribological Systems of the Piston Engine / K. Gavrilov [et al.] // Tribology in Industry, Vol. 39, No. 3 (2017). P. 329-333.

4. **Jeng, Yeau-Ren** Changes of Surface Topography During Running-In Process / Yeau-Ren Jeng, Zhi-Way lin, Shiuh-Hwa Shyu. // Journal of Tribology. Vol. 126(3), 620-625 (Jun 28, 2004) (6 pages).

5. **Novotny, P.** Mixed Lubrication Solution of Dynamically Loaded Radial Slide Bearings / P. Novotny // Tribology in Industry, Vol. 39, No. 1 (2017). P. 82-89.

6. **Ohue, Y.** Effect of Surface Texturing on Lubricating Condition under Point Contact Using Numerical Analysis/ Y. Ohue, H. Tanaka// J. Scientific Research №4, 2013. – P. 379-385.

7. Метод моделирования контактного взаимодействия шероховатых поверхностей в гидродинамических подшипниках скольжения / Ю.В. Рождественский [и др.] // Материалы десятой научной конференции аспирантов и докторантов. Министерство образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет. 2018 Издательский центр ЮУрГУ. с. 71-78.

8. **Гаврилов, К.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «МИКРОГЕОМЕТРИЯ ТРИБОСИСТЕМЫ ПОРШЕНЬ-ЦИЛИНДР» / К.В. Гаврилов, М.А. Иззатуллоев, Т.В. Садреев // № 2018663437 от 26 октября 2018 г.

9. **Fang, C.** A piston tribodynamic model with deterministic consideration of skirt surface grooves/ C. Fang, X. Meng, Y. Xie// J. Tribology international, 2017. – 42 p.

УДК 621.891+06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_266

П.Г. Иваночкин, д-р техн. наук, **О.А. Беляк,** канд. физ.-мат. наук, **Д.С. Мантуров,** канд. техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения), **С.А. Данильченко** (Южный федеральный университет), **А.И. Азоян**, **Е.Д. Аникина** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИФИНОЛЬНЫХ СМОЛ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Аннотация. *Разработана методология создания простых в изготовлении полимерных композитов для работы в тяжелонагруженных узлах трения. В качестве матрицы использована эпоксифенольная смола, в качестве наполнителя = шпинель железа. Механические свойства композита определялись* ***в*** *рамках концепции эффективной гомогенности на основании дифференциальной схемы метода самосогласования. Представлены результаты исследований влияния концентрации наполнителя на механические и трибологические свойства.*

A methodology has been developed for creating easy-to-manufacture polymer composites for operation in heavily loaded friction units. Epoxyphenol resin was used as a matrix, iron spinel was used as a filler. The mechanical properties of the composite were determined within the framework of the concept of effective homogeneity based on the differential scheme of the self-consistency method. The results of studies of the effect of filler concentration on mechanical and tribological properties are presented.

Ключевые слова: эпоксифенольные смолы, шпинель, полимерные композиционные материалы, микротвердость, коэффициент трения
Keywords: epoxyphenolic resins, spinel, polymer composite materials, microhardness, coefficient of friction

В условиях современной устойчивой тенденции к увеличению внешних механических и термических нагрузок насущной необходимостью становится поиск материала, успешно работающего в тяжелонагруженных узлах трения. Эксплуатация такого материала в узлах трения без использования смазочного материала требует от него высокой теплостойкости, прочности, износостойкости и низкого коэффициента трения. На сегодняшний день применение эпоксидных смол в промышленности композиционных материалов широко распространено. Использование этих материалов в машиностроении обусловлено высокими механическими свойствами и простотой их изготовления [1-5]. В настоящее время представители этого класса композитов находят широкое применение в качестве фрикционного полимерного материала (ФПМ) в тормозах и муфтах транспортных средств. В настоящей работе предпринята попытка рассмотреть возможность использования композиционного материала на основе эпоксидной смолы в тяжелонагруженных узлах трения.

Варьировать свойствами композиционных материалов возможно не только изменением и разнообразием структуры основы, но и введением наполнителей. Известно, что введение в матрицу композита механоактивированных мелкодисперсных частиц, обладающих высокой прочностью, позволяет снизить износ композиции, а также управлять ее фрикционными свойствами. Наночастицы оказывают существенный эффект на механизм контактных триботехнических превращений, формирование слоев переноса на контртело и износостойкость полимерного материала.

Материалы и методы

В данной работе в качестве основы для создания композиционного материала использовали эпоксифенольную смолу марки ЭД20 (ГОСТ 10587-84), белый или светло-серый кристаллический порошок, имеющий молекулярную массу 81,08. В качестве отвердителя использовали раствор гексаметилендиамина в этиловом спирте (ПЭПА).

В качестве наполнителя была выбрана шпинель железа. Перед смешиванием с основой компоненты шпинели измельчались до размеров ≈40 нм. Процесс измельчения и механоактивации проводился на планетарной мономельнице Fritsch PULVERISETTE 6.

Морфология и размер частиц определялись с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss EVO MA-18.

Соотношение наполнителя к основе были определены как 3, 6, 9, 12 и 15 масс. %, а также добавление порошка фторопласта 6 масс. % к наполнителю шпинели 6 масс. %. Полимеризацию композиции проводили введением отвердителя в стехиометрическом соотношении. Формирование образцов происходило при нормальных атмосферных условиях путем заливки в формы. Из неотвержденных образцов, методом вакуумирования, удалялись воздушные пузыри. Отверждение, как завершающий этап формирования композиционного материала, проводилось в суховоздушном шкафу с выдержкой при температуре 95 °С в течение 12 часов.

Исследование влияния наполнителей на трибологические и физико-механические свойства композитов на основе математических моделей представлены рядом работ [6-9]. В настоящей работе в рамках концепции эффективной гомогенности на основании диффренциальной схемы метода самосогласования определялись механические свойства гетерогенных композиционных материалов с матрицей на основе эпоксифенольной смолы марки ЭД20 и гибридными наполнителями (шпинель, фторопласт). Результаты, полученные в рамках такого подхода, были сопоставлены с результатами, рассчитанными на основе конечно-элементного моделирования представительного объема многофазной среды, а также согласуются с исследованиями других авторов [9].

В рамках такого подхода композит, представляющий собой двухфазную среду, может быть заменен эквивалентной однородной упругой средой. Определение эффективных упругих постоянных такой среды произведено на основе дифференциальной схемы метода самосогласования (1) [9 –11]:

$$\frac{dC^{eff}(\varphi)}{d\varphi} = \frac{1}{1-\phi}\left(C^{v} - C^{eff}(\phi)\right)\left(\mathrm{I} + S(\phi)(C^{eff}(\phi))^{-1}\left(C^{v} - C^{eff}(\phi)\right)\right)^{-1},$$
$$C^{eff}(0) = C_{M}. \qquad (1)$$

где C^{m}, C^{v} – тензоры упругих модулей четвертого ранга матрицы композита и включений соответственно,

S – несимметричный тензор Эшелби четвертого ранга [12],

I – единичный тензор,

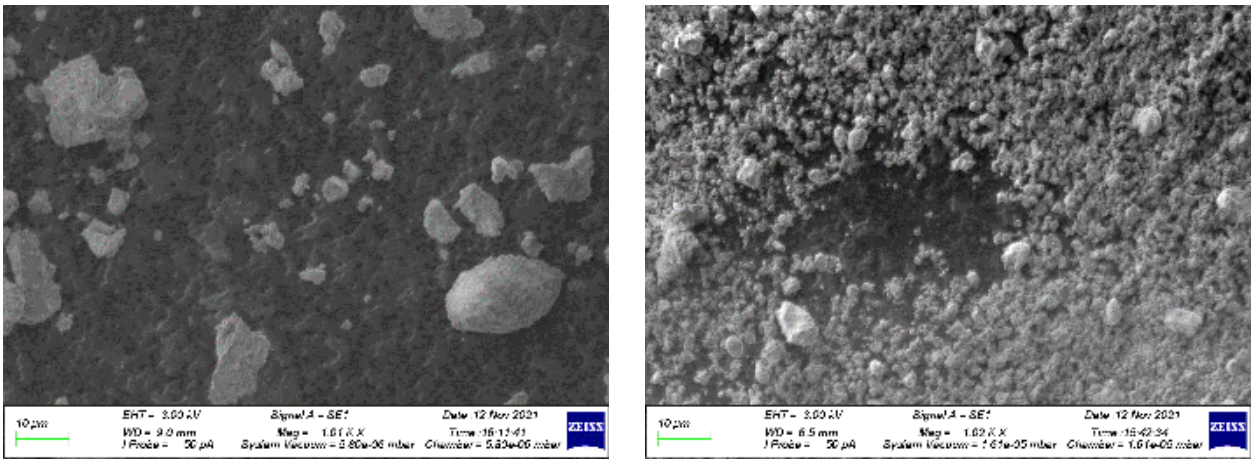
$\phi = V_{v} / (V_{m} + V_{v})$ – объемная доля включений.

Для оценки физико-механических характеристик образцов методом индентирования проводились измерения с помощью системы анализа свойств материалов NanoTest 600 фирмы «Micro materials Ltd». Методика проведения соответствующих измерений описана в [13].

Сравнительные трибологические лабораторные испытания проводились на трибометре TRB с использованием методики DIN 50324. Режимы испытания: схема «шар-диск», вращательное движении диска (образца) с линейной скоростью 0,1 м/с, усилие на штифте составляло 0,5 и 1 Н. Контртелом для испытаний образцов композиционного материала выбран шар из стали (ШХ15) диаметром 6 мм. Продолжительность испытания составляла 500 м.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам электронной микроскопии, представленным на рисунке 1, были определены форма и размер частиц после проведенной механоактивации. Изучение этих микрофотографий показывает, что частицы имеют форму близкую к сферической или эллипсоидальной. Были изготовлены образцы композиционного материала с наполнителями в виде полученных мелкодисперсных порошков шпинели.



а *б*

Рис. 1. Микрофотографии порошка шпинели железа

а – исходная, *б* – после проведения механоактивации

Численный эксперимент с целью прогнозирования эффективных упругих модулей гетерогенных композиционных материалов был проведен при следующих входных параметрах: E_p=3.58·10^3 МПа, ν_p=0.39 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона смолы ЭД-20, E_s=271·10^3 МПа, ν_s=0.26 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона шпинели. При этом модуль Юнга смолы был определен на основе наноиндентирования изготовленного образца. По его результатам рассчитывался приведенный модуль упругости, на основании которого, а также коэффициента Пуассона из формулы (2) определялась искомая величина модуля Юнга.

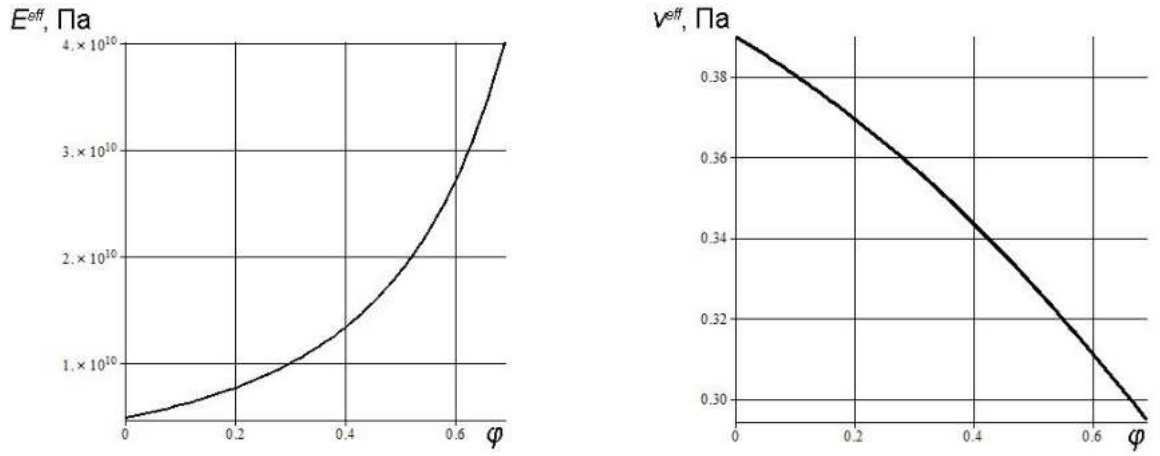
$$\frac{1}{E_r}=\frac{1-\nu^2}{E}+\frac{1-\nu_{ind}^2}{E_{ind}}, \qquad (2)$$

где E_{ind} и ν_{ind} – модуль Юнга и коэффициент Пуассона алмазного индентора.

На основании этих данных были произведены расчеты эффективных модулей для композита на основе эпоксифенольной смолы марки ЭД20 с 6% шпинели железа. Полученные значения сравнивались с осредненными данными наноиндентирования, процедура которого состояла из 25 уколов в различных точках поверхности. Относительная погрешность между теоретически полученным значением модуля Юнга на основании выражения (1) и значением, определенным на основе наноиндентирования, составила ε=5.06%. Далее были произведены численные расчеты эффективных характеристик композита с различным объемным содержанием шпинели (φ). На рисунке 2 приведены графики изменения модуля Юнга и коэффициент Пуассона в зависимости от φ.

Из представленных расчетов следует, что с увеличением процентного содержания шпинели упругий модуль композита возрастает, а коэффициент Пуассона уменьшается.

По результатам измерения физико-механических характеристик были получены значения микротвердости и модуля упругости экспериментальных образцов. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении прочностных характеристик наполненного композита по сравнению с исходным полимером, что позволяет существенно улучшить его износостойкость.



а *б*

Рис. 2. Графики изменения модуля Юнга (*а*) и коэффициент Пуассона (*б*) в зависимости от процентного содержания шпинели

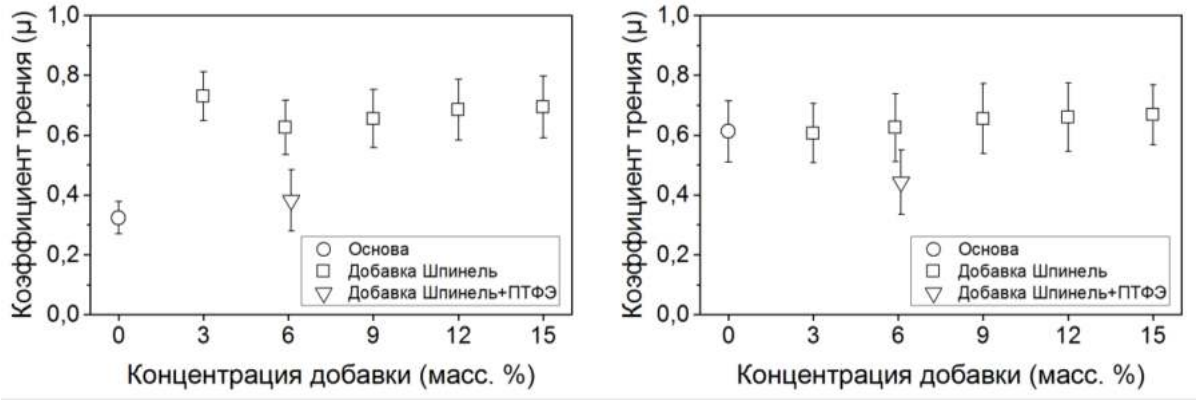
Некоторые характерные значения физико-механических характеристик представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения микротвердости и модуля упругости образцов

Наименование образца	Микротвердость, МПа	Модуль упругости, $\cdot 10^3$ МПа
Смола ЭД-20	162	3,58
Смола ЭД-20 + 6 % шпинели железа	250	5,10
Смола ЭД-20 + 6 % шпинели железа + 6% ПТФЭ	236	4,73

На следующем этапе нами были проведены исследования трибологических характеристик образцов. На рисунке 3 представлено влияние концентрации шпинели на коэффициент трения. Установлено, что при малой нагрузке (усилие на штифте 0,5 Н) добавка шпинели ухудшает коэффициент трения, а при нагрузке равной 1 Н коэффициент трения наполненного композита становится соразмерным с его значением для основы. При добавлении фторопласта коэффициент трения снижается.



а *б*

Рис. 3. Влияние концентрации добавки шпинели на коэффициент трения при различной нагрузке

а – нагрузка 0,5 Н, *б* – нагрузка 1 Н.

Выводы

На основании анализа и систематизации полученных экспериментальных данных разработана методология создания простых в изготовлении полимерных композитов для работы в тяжелонагруженных узлах трения. Введение в эпоксифенольную смолу марки ЭД20 активных нанодобавок с развитой поверхностью (шпинели металлов) приводит к существенному увеличению прочностных характеристик, что позволяет на порядок уменьшить удельный износ композита, при этом незначительно ухудшив его антифрикционные свойства. Использование гибридных наполнителей (шпинель железа+фторопласт) позволяет без ухудшения прочностных характеристик композита снизить коэффициент трения в случае больших удельных нагрузок.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00614.

Библиографический список

1. **Кочнова, З.А.** Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты / З.А. Кочнова, Е.С. Жаворонок, А. Е. Чалых. – М.: Пэйнт-Медиа, 2006. – 200 с.

2. **Петрова, А.П.** Клеящие материалы. Справочник / Под ред. Е.Н. Каблова, С.В. Резниченко. М. ЗАО «Редакция журнала «Каучук и резина», 2002. – 196 с.

3. **Михайлин, Ю. А.** Конструкционные полимерные композиционные материалы. НОТ, 2013. – 822 с.

4. **Торлова, А.С.** Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол / А.С. Торлова, И.А. Виткалова, Е.С. Пикалов // Научное обозрение. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 96-114.

5. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин [и др.] — Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2017. — 311 с.

6. **Суворова, Т.В.** Контактные задачи для пористоупругого композита при наличии сил трения / Т.В. Суворова, О.А. Беляк // Прикладная математика и механика. – 2020. – Т. 84. – № 4. – С. 529–539

7. **Belyak, O.A**. Modelling stress deformed state upon contact with the bodies of two-phase microstructure / O.A. Belyak, T.V. Suvorova // Solid State Phenomena. – 2020. – V. 299. – P. 124–129.

8. **Колесников, В.И.** Математические модели и экспериментальные исследования – основа конструирования гетерогенных антифрикционных материалов/ В.И. Колесников, О.А. Беляк. –М: Физматлит, 2021. – 216 с.

9. **Sevostianov, I.** Generalization of Maxwell homogenization scheme for elastic material containing inhomogeneities of diverse shape / I. Sevostianov, A. Giraud // International Journal of Engineering Science. Elsevier. — 2013. — Vol. 64. — P. 23 – 36.

10. **Belyak, O.A.** Modeling Stress Deformed State Upon Contact with the Bodies of Two-Phase Microstructure / O.A. Belyak, T.V. Suvorova // Solid State Phenomena. —2020. — Vol. 299. — P. 124— 129.

11. **Giordano, S.** Differential schemes for the elastic characterisation of dispersions of randomly oriented ellipsoids // European Journal of Mechanics A/Solids. — 2003. — Vol. 22, No.6. — P. 885 – 902.

12. **Кристенсен, Р.** Введение в механику композитов. — М.: Мир, 1982. — 335 с.

Ivanochkin, P.G. The influence of antifriction fillers on the mechanical and thermal characteristics of metal polymer tribosystems / P.G. Ivanochkin, S.A. Danilchenko // Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. - 2016. - Vol. 175. P. 539-550.

УДК 539.3:519.6 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_271

В.И. Колесников, академик РАН, **О.А. Беляк,** канд. физ.-мат. наук, **Т.В. Суворова,** д-р физ.-мат. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ВИБРАЦИЯ ШТАМПА НА СЛОИСТОМ ГЕТЕРОГЕННОМ ОСНОВАНИИ ПРИ УЧЕТЕ ТРЕНИЯ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА

Аннотация. *Описывается решение контактной задачи для двухслойного гетерогенного полупространства, дан численный анализ касательных напряжений*
The solution of the contact problem for a two-layer heterogeneous half-space is described. Numerical analysis of shear stresses is given.

Ключевые слова: контактная задача, двухслойная гетерогенное полупространство
Keywords: contact problem, two-layer heterogeneous half-space.

Проблемы контактного взаимодействия при учете сил трения и различные аспекты управления этим многопараметрическим процессом привлекают большое внимание исследователей ввиду обширных приложений в трибологии, медицине, промышленности, судостроении, космическом оборудовании. Весьма значителен экономический эффект при использовании более эффективных узлов трения. В последнее время активно используются новые антифрикционные наномодифицированные композиционные материалы, в том числе маслосодержащие композиты, обладающие широким спектром физико-механических свойств, поскольку использование традиционных материалов не способно обеспечить весь спектр требований к контактирующим поверхностям. Создание новых материалов, сочетающих в себе высокую механическую прочность при низком удельном весе, повышенную износостойкость и требуемые антифрикционные свойства, является актуальной, но многоэтапной сложной задачей, включающей трудоемкие технологии, что показано в цикле работ исследователей школы академика РАН Колесникова В.И. Поэтому так привлекательна возможность получить до создания композита информацию о его физико-механических свойствах на основе математических моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние многофазных сред при контактном взаимодействии. В настоящей работе проводится исследование динамической контактной задачи для многофазного слоистого основания при учете трения в области контакта. Микроструктура гетерогенных сред с дискретными и непрерывными фазами была учтена в рамках модели Био-Френкеля. Такая математическая модель позволяет на основе анализа динамических процессов, прогнозировать свойства новых искусственно созданных материалов. Следует отметить, что применение для гетерогенных сред программных комплексов, таких, как ANSYS, COSMOS, ABAQUS NASTRAN весьма ограничено.

Для описания микроструктуры основания, состоящего из изотропной вязкоупругой матрицы и флюида наполнителя, обладающего свойствами вязкой аморфной жидкости, использованы уравнения гетерогенной среды Био [1]. Механические характеристики материала матрицы определяются экспериментально методом наноиндентирования. Изменение механических модулей среды при варьировании пористости изучено с помощью дифференциальной схемы метода самосогласования. Отметим, что контактные задачи в квазистатической постановке для однородных вязкоупругих сред, которые моделируют поверхностные явления в трибологии, рассмотрены в работах [2, 3], где показано, что свойства контактирующих поверхностей в значительной степени влияют на силу трения. Влияние микроструктуры основания на контактные напряжения представлено в работах [4–6], где рассмотрены контактные задачи в квазистатической и динамической постановках, а микроструктура гетерогенной среды описана в рамках модели Био-Френкеля. В настоящей работе представлен новый подход к изучению поверхностного взаимодействия в зоне контакта при учете гетерогенности основания в рамках модели двухфазной среды Био-Френкеля и динамического

воздействия. Исследованы зависимости сил трения от микроструктуры композита, вязкости наполняющего поры флюида, степени взаимодействия фаз, проницаемости среды.

Рассматривается контактная задача о колебаниях жесткого штампа с плоским основанием на поверхности гетерогенного двухслойного полупространства под действием приложенной к нему силы, изменяющейся по гармоническому закону. Пусть двухфазная среда, состоящая из вязкоупругой пористой матрицы-скелета и флюида, заполняющего поры, занимает плоскую область $|x|<\infty,\ y\le 0$, а покрывающий ее слой $-\infty<x<\infty, 0\le y\le h$. На лицевой непроницаемой границе осциллирует с частотой ω жесткий штамп шириной $2a$ под действием силы, которая приложена к штампу так, чтобы обеспечить полный контакт с поверхностью. В области контакта $|x|\le a$ нормальные и касательные напряжения связаны законом Амонтона-Кулона. Для учета внутренней микроструктуры основания используем, как наиболее апробированную, модель, описываемую уравнениями гетерогенной двухфазной среды Био – Френкеля в перемещениях [1]. Считаем, что режим колебаний установившийся, при этом отделим временной множитель и изложение будем вести для безразмерных амплитудных значений соответствующих функций, при этом линейные размеры отнесены к полуширине штампа, а напряжения – к модулю сдвига N матрицы.

$$
\begin{aligned}
&(q_{11}-2)\nabla\cdot\nabla\mathbf{u}+2\nabla\nabla\cdot\mathbf{u}+q_{12}\nabla\nabla\cdot\mathbf{v}+\vartheta^2(\gamma_{11}\mathbf{u}+\gamma_{12}\mathbf{v})=0,\\
&q_{12}\nabla\nabla\cdot\mathbf{u}+q_{22}\nabla\nabla\cdot\mathbf{v}+\vartheta^2(\gamma_{12}\mathbf{u}+\gamma_{22}\mathbf{v})=0,\\
&\rho=\rho_{11}+2\rho_{12}+\rho_{22},\qquad \vartheta^2=\rho\omega^2 l^2/N,\\
&\gamma_{11}=\frac{\rho_{11}+ib/\omega}{\rho},\ \gamma_{12}=\frac{\rho_{12}-ib/\omega}{\rho},\ \gamma_{22}=\frac{\rho_{22}+ib/\omega}{\rho},
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где $q_{ij},\ i,j=1,2$, $A,N,Q,R,\rho_{11},\rho_{12},\rho_{22}$ – механические характеристики двухфазной среды [4], $e_{ij},\varepsilon_{ij},\ \ i,j=1,2$ – компоненты тензоров деформации, соответствующие векторам перемещений твердой фазы $\mathbf{u}\{u_1,u_2\}$ и жидкой фазы $\mathbf{v}\{v_1,v_2\}$, $e=\nabla\cdot\mathbf{u}$, $\varepsilon=\nabla\cdot\mathbf{v}$, $b=m^2\eta k_o^{-1}$, а η, k_o – динамическая вязкость флюида и проницаемость среды соответственно. Полный тензор напряжений, действующий в гетерогенной среде – $\Gamma_{ij}=\sigma_{ij}^s+\delta_{ij}\sigma^f,\ i,j=1,2$, $\sigma_{ij}^s=Ae\delta_{ij}+2Ne_{ij}+Q\varepsilon\delta_{ij}$ – тензор напряжений, действующий на вязко-упругий скелет, $\sigma^f=Qe+R\varepsilon$ – давления, действующие на жидкость в порах. Вязкость матрицы композита учтена в рамках модели частотно-независимого внутреннего трения, при этом модуль сдвига имеет вид $N\cdot\cdot N(1+i\beta)$, где величина β пропорциональна коэффициенту потерь вязкоупругого материала. Вследствие этого присутствует малая комплексная составляющая в коэффициентах уравнения (1.1) N, A, Q, R, $q_{ij},\ i,j=1,2$.

Не уменьшая общности, для краткости изложения будем полагать подстилающее полупространство изотропным упругим, вязкость которого линейна и частотно независима, перемещения $\mathbf{u}^0\{u_1^0(x,y),u_2^0(x,y)\}$ в вязкоупругом полупространстве определяется уравнениями Ламе с комплексными модулями упругости. На границе слоя и полупространства выполняются условия равенства напряжений и перемещений, непроницаемости.

Граничные условия на лицевой поверхности пакета имеют вид:

$$
\begin{aligned}
&u_2(x,0)=v_2(x,0),\ \ \Gamma_{21}(x,0)=\Gamma_{22}(x,0)=0,\ \ |x|>1,\\
&\Gamma_{21}(x,0)=\mu_{tr}\Gamma_{22}(x,0),\ \Gamma_{22}(x,0)=q_2(x),\ \ u_2(x,0)=\delta,\ \ |x_1|\le 1,
\end{aligned}
\tag{2}
$$

где δ – заданная осадка штампа,

μ_{tr} – коэффициент трения.

Замыкают постановку краевой задачи (1) – (2) условие излучения волн на бесконечность. Определению подлежат контактные давления $q_2(x)$.

Решение представленной задачи строиться в образах преобразования Фурье. При этом необходимы выражения для матриц Грина, связывающих перемещения и напряжения для каждой из составляющих сред, которые строятся на основе идей потенциала. Для гетерогенного слоя задача предварительно разбивается на симметричную и кососимметричную, что позволяет уменьшить вдвое порядок вычисляемых определителей, таким образом были построены матрицы-функции Грина $\mathbf{K}_u(\alpha, x_2)$, $\mathbf{K}_v(\alpha, x_2)$ для перемещений скелета и перемещений флюида [6]. Далее, получена связь перемещений и напряжений на границе двухфазной среды:

$$\boldsymbol{u}(x_1) = \frac{1}{2\pi}\int_{\Upsilon} \boldsymbol{K}_u(\alpha,0)\mathbf{Q}(\alpha)e^{-i\alpha x_1}d\alpha,\ \ \boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}_1) = \frac{1}{2\pi}\int_{\Upsilon} \boldsymbol{K}_v(\alpha,0)\mathbf{Q}(\alpha)e^{-i\alpha x_1}d\alpha,$$

$$\mathbf{Q}(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{q}\left(x_1\right)e^{i\alpha x_1}dx_1,\ \ \boldsymbol{q}\left(x_1\right) = \left\{\Gamma_{21}\left(x_1\right), \Gamma_{22}\left(x_1\right)\right\},$$

Удовлетворяя граничным условиям (2), а также граничным условиям на стыке слоев, приходим к интегральному уравнению 1-го рода с разностным ядром относительно искомой функции:

$$\int_{-1}^{1} K(x\ -\xi)q_2(\xi)d\xi = \delta\,. \tag{3}$$

Ядро интегрального уравнения (3) имеет вид:

$$K(x-\xi) = \frac{1}{2\pi}\int_{\Upsilon} K(\alpha)e^{i\alpha(x-\xi)}d\alpha,$$

$$K(\alpha) = \mu_{tr}K_{21}(\alpha) + K_{22}(\alpha),$$

где α – параметр преобразования Фурье, функции $K_{ij}(\alpha),\ i,j=1,2$ в комплексной плоскости являются элементами матрицы Грина для гетерогенного слоистого основания, θ_k – приведенные частоты колебаний, соответствующие трем типам распространяющихся волн в гетерогенной среде [6]. Проведено асимптотическое исследование символа ядра интегрального уравнения $K(\alpha)$ при малых и больших значениях параметра преобразования α. Значения в нуле характеризуют среднее значение контактного давления, а поведение на бесконечности – структуру контактного давления у границ области контакта [7]:

$$\lim_{\alpha\to\infty} K_{ii}(\alpha) = d_{ii}/|\alpha|,\ \lim_{\alpha\to\infty} K_{ij}(\alpha) = (-1)^i d_{ij}/\alpha,\ \ i\neq j,$$

$$\lim_{\alpha\to 0} K(\alpha) = i(m_1 - m_2)/D,$$

$$D = D(\omega, A, N, Q, R, h),$$

$K_{ii}(\alpha)$ являются мероморфными функциями в комплексной плоскости, имеют одни и те же полюса. Доказано аналитически, что гетерогенный слой существенно изменяет динамику гетерогенной среды. Динамические свойства формирует гетерогенное покрытие, наличие упругой подложки – полупространства, приводит к количественному сдвигу, по сравнению с жестким основанием.

Решение интегрального уравнения (3) решается численно-аналитическим методом. Сначала проводится регуляризация ядра интегрального уравнения (3) с использованием его асимптотического представления на бесконечности, затем, при реализации вычислительной схемы, на основе метода граничных элементов, решение интегрального уравнения сводится к решению конечной алгебраической системы относительно неизвестных узловых значений $q_2(\xi_k),\ k=1,2,...,N$ искомой функции. Численно исследуется скорость сходимости приближенного алгоритма решения интегрального уравнения.

В соответствии с изложенным способом были определены нормальные и касательные контактные напряжения, горизонтальные смещения под штампом. Расчеты проводились для

механических характеристик, соответствующих двухкомпонентному композиционному материалу с матрицей на основе ароматического полиамида фенилона, модифицированного наноразмерной добавкой *TiN* [9] и содержанием наполнителя – цилиндрового масла. Корректное определение механических характеристик A, R, Q, N среды Био для гетерогенного композита было реализовано на основе простой и дифференциальной схем метода самосогласования [10, 11]. Было исследовано влияние пористости на модуль объемного сжатия пористой среды с незаполненными порами K_b. Сопоставлены результаты, полученные на основе дифференциальной и простой схемы метода самосогласования, При малой пористости (m<0.2), относительная погрешность двух способов расчета не превышала 3%. Таким образом, коэффициенты уравнений (1) по известным модулям объемного сжатия вязкоупругой матрицы K_s, пористой среды с незаполненными порами K_b, флюида K_f, пористости m вычислялись по формулам [12].

Расчеты проводились при следующих данных: $K_s = 6.48$ ГПа, $K_f = 2$ ГПа, $N = 2.37$ ГПа, $\rho_s = 1.3 \cdot 10^3$ кг/ м^3, $\rho_f = 0.93 \cdot 10^3$ кг/м3, K_b(m=0.05)=5.48 ГПа, K_b(m=0.1)=4.50 ГПа, K_b (m=0.15)=3.51 ГПа, K_b(m=0.2)=2.52 ГПа, $\omega = 50$ Гц. Экспериментальное определение коэффициента взаимодействия фаз, проницаемости композита является весьма сложной и трудоемкой задачей. Будем опираться на известные данные для искусственных сред [13] коэффициент проницаемости находится в интервале $10^{-14} < k_o < 10^{-10}$ м^2, а извилистость поровых каналов соответствовала случаю частиц сферической формы.

Установлено, что зависимость нормальных и касательных контактных напряжений от пористости гетерогенного основания носит нелинейный характер. Контактные нормальные и касательные напряжения в значительной мере зависят от пористости и массовой доли флюида-наполнителя. При этом, распределение напряжений по области контакта несимметрично, но для случая динамического нагружения влияние коэффициента трения на контактные давления более выражено, чем в задачах в квазистатической постановке [4].

Распределение модуля касательных контактных давлений $|\Gamma_{21}(x)|$ при изменении толщины слоя приведено на рис. 1. при значениях $\mu_{tr} = 0.2, \delta_0 = 1, \beta = 0.05$.

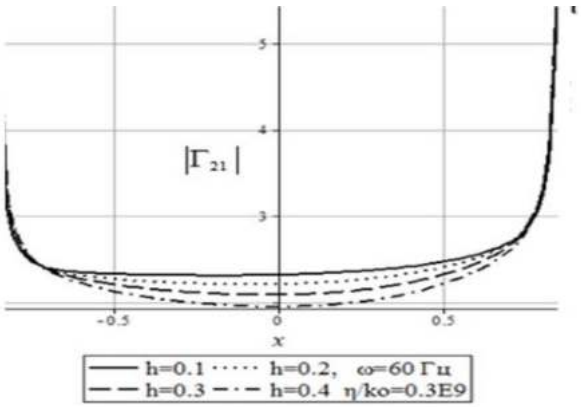


Рис. 1. Влияние пористости гетерогенного основания на распределение касательных контактных напряжений

Контактные напряжения и горизонтальные перемещения под штампом для гетерогенного основания зависят не только от коэффициента трения в области контакта, но и существенным образом зависят от частоты колебаний, пористости, проницаемости среды, вязкости флюида. Изменение коэффициента трения при вибрации имеет значительно большее влияние на контактные напряжения, чем в квазистатической задаче при движении штампа.

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Библиографический список

1. **Био, М.А.** Механика деформирования и распространения акустических волн в пористой среде / М.А. Био // Период. сб. переводов иностр. статей. – 1963, –В. 6, – № 82, – С. 103-134.

2. Трение эластомеров. Моделирование и эксперимент / И.Г. Горячева [и др.] // Москва. Ижевск. Институт компьютерных исследований. – 2020. – 204 с.

3. **Торская, Е.В.** Модели фрикционного взаимодействия тел с покрытиями / Е.В. Торская // Москва. Ижевск. Институт компьютерных исследований. –2020. – 296 с.

4. **Суворова, Т.В.** Контактные задачи для пористоупругого композита при наличии сил трения / Т.В. Суворова, О.А. Беляк // Прикладная математика и механика. – 2020, – Т. 84, – № 4, – С. 529 – 539.

5. **Суворова, Т.В.** Колебания штампа на поверхности гетерогенного слоя при учете трения в области контакта / Т.В. Суворова, О.А. Беляк // Прикладная математика и механика. – 2021, – Т. 85, – № 3, – С. 321 - 331.

6. **Kolesnikov, V.I.** Modeling antifriction properties of composite based on dynamic contact problem for a heterogeneous foundation / V.I. Kolesnikov, T.V. Suvorova, O.A. Belyak // Materials Physics and Mechanics. – 2020, – Vol. 46, – No. 1, – P. 139 - 148.

7. **Ворович, И.И.** Неклассические смешанные задачи теории упругости / И.И. Ворович, В.М. Александров, В.А. Бабешко // Москва. Наука. – 1974. – 456 с.

8. **Ворович, И.И.** Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей / И.И. Ворович, В.А. Бабешко // Москва. Наука. – 1979. – 319 с.

9. Elastic constants of single-crystal transition-metal nitride films measured by line-focus acoustic microscopy / J.O. Kim [et al.] // J. Appl. Phys. – 1992, №.72, – P. 1805.

10. **Belyak, O.A.** Modeling Stress Deformed State Upon Contact with the Bodies of Two-Phase Microstructure / O.A. Belyak, T.V. Suvorova // Solid State Phenomena. – 2020, – Vol. 299, – P. 124 - 129.

11. **Sevostianov, I.** Generalization of Maxwell homogenization scheme for elastic material containing inhomogeneities of diverse shape / I. Sevostianov, A. Giraud // International Journal of Engineering Science. Elsevier. – 2013, – Vol. 64, – P. 23 - 36.

12. **Колесников, В.И.** О математической модели для прогнозирования трибологических свойств маслонаполненных композитов при вибрации / В.И. Колесников [и др.] // Доклады РАН. – 2020, – Т. 491, – С. 44-47.

Borisov, V.E. Numerical Simulation of Laboratory Experiments on the Analysis of Filtration Flows in Poroelastic Media / V.E. Borisov, E.V. Zenchenko, B.V. Kritsky // Herald of the Bauman Moscow state technical university. Series natural sciences. – 2020, – V.88, – №.1, – P. 16 - 31.

УДК 620.178.16:621.0 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_275

Н.А. Махутов, член-корреспондент РАН, **М.М. Гаденин,** канд. техн. наук, **Д.О. Резников**, канд. техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН*)*

ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ СОЧЕТАНИИ КОНТАКТНЫХ И НЕКОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Аннотация. *Подвижной состав и инфраструктура железнодорожного транспорта функционируют в сложных эксплуатационных и природно-климатических условиях: при статических, динамических и циклических воздействиях (весовых, инерционных, вибрационных, термических, сейсмических, аэрогидродинамических, электромагнитных). При этом в сопряженных элементах, узлах и изделиях имеют место сложные сочетания контактных и бесконтактных напряжений и деформаций. Это определяет одновременно происходящие процессы*

упругопластического деформирования, накопления повреждений от усталости, трения и износа с учетом общих и локальных термоциклических нагружений. Для ряда сложных условий и сценариев нагружения поставлены задачи интегрированного рассмотрения унифицированных базовых основ механики деформированных твердых тел, накопления суммарных повреждений, деградации и разрушения. Они могут быть распространены на случаи контактного, бесконтактного и комбинированного нагружения. Решение таких проблем возможно на единой научной базе, включающей обобщенный анализ внутренних и внешних воздействий, возникающих напряженно-деформированных состояний, деформационных и силовых критериев разрушения с учетом нелинейности и термосвязности процессов микро-, и макроразрушения.

The rolling stock and infrastructure of railway transport function in complicated complex service and climatic conditions: at static, dynamic and cyclic impacts (weight, inertial, vibration, thermal, seismic, aero hydrodynamic, electromagnetic). At the same time in the interfaced parts, components and units complex combinations of contact and contactless stresses and deformations take place. It defines at the same time happening processes of an elastoplastic deformation, accumulation of damages from fatigue, friction and wear taking into account the general and local thermal-cyclic loadings. For a number of complicated conditions and scenarios of a loading the tasks of the integrated consideration of the unified basic essential principles of mechanics of the deformed solid bodies, accumulation of total damages, degradations of material and fracture are set. They can be extended to cases of the contact, contactless and combined loading. The solution of such problems is possible on the uniform scientific base including the generalized analysis of internal and external impacts, the arising stress-strain states, deformation and force criteria of fracture taking into account nonlinearity and thermoconnectivity of micro and macrofractures processes.

Ключевые слова: прочность, износ, износостойкость, силовое воздействие, зоны контакта, напряжения, деформации, железнодорожный транспорт.
Keywords: strength, wear, wear resistance, force impact, contact zones, stresses, deformations, railway transport.

1. Постановка проблем

Современный железнодорожный транспорт с его подвижным составом и инфраструктурой является сложным компонентом всего транспортного комплекса страны. На протяжении почти двухвековой истории своего развития он непрерывно совершенствовался и увеличивал свои перевозочные способности. При этом усложнялись условия его функционирования в различных природно-климатических зонах с постепенным увеличением скоростей движения, грузо- и пассажиропотоков, протяженности железных дорог. Эти обстоятельства получили свое отражение в необходимости решения всё новых комплексных научных, инженерных, технологических и эксплуатационных задач в области расчетно-экспериментального обоснования прочности, износостойкости, живучести, ресурса, надежности и безопасности [1-5]. При таком подходе осуществлялась направленная взаимоувязанная декомпозиция объектов железнодорожного транспорта (рис. 1) по узлам и компонентам, типам основных и смешанных повреждений, ведущих к отказам, авариям и катастрофам.

С учетом взаимодействия узлов и компонентов объектов железнодорожного транспорта и развития методов анализа механизмов раздельных классических повреждений (усталость, износ, фреттинг, термоусталость) в последние десятилетия всё более актуальным становилась проблема сочетающихся и комбинированных микро- и макроповреждений, характерных практически для всех компонентов подвижного состава и инфраструктуры с привлечением для их анализа базовых положений теорий упругости, пластичности, прочности, усталости, трения, износа, механики деформирования и разрушения. В такой постановке это отвечает общей направленности проблематики Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем – 2021».

Рис. 1. Структура взаимодействующих компонентов железнодорожного транспорта

2. Основы унифицированных исследований процессов контактного и неконтактного взаимодействия

Для всех сопряженных узлов и элементов железнодорожного транспорта по рис. 1 можно провести [1] их схематизацию (рис. 2) с выделением:

- контактирующих тела (Т) и контртела (К);
- их подвижности и неподвижности;
- бесконтактных тел.

Для первого случая задачи сводятся к определению контактной прочности и долговечности; для второго – к определению износа, фреттинг-усталости и фреттинг-износу; для третьего – к определению прочности и долговечности при отсутствии контакта.

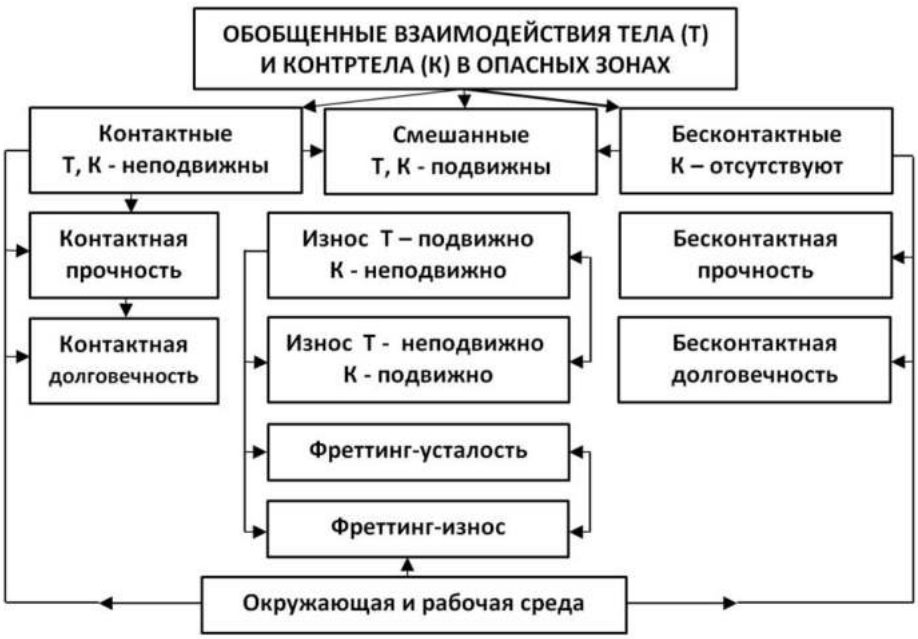


Рис. 2. Схема и результаты взаимодействий контактирующих элементов

На протяжении многих десятилетий в ведущих академических институтах (ИМАШ, ФТИ, ИПМех, ИМЕТ) и железнодорожных институтах (ВНИИЖТ, ВНИКТИ, РГУПС) страны

с участием известных научных специалистов были решены [2-5] важнейшие задачи контактной прочности, износостойкости, циклической прочности (рис. 3).

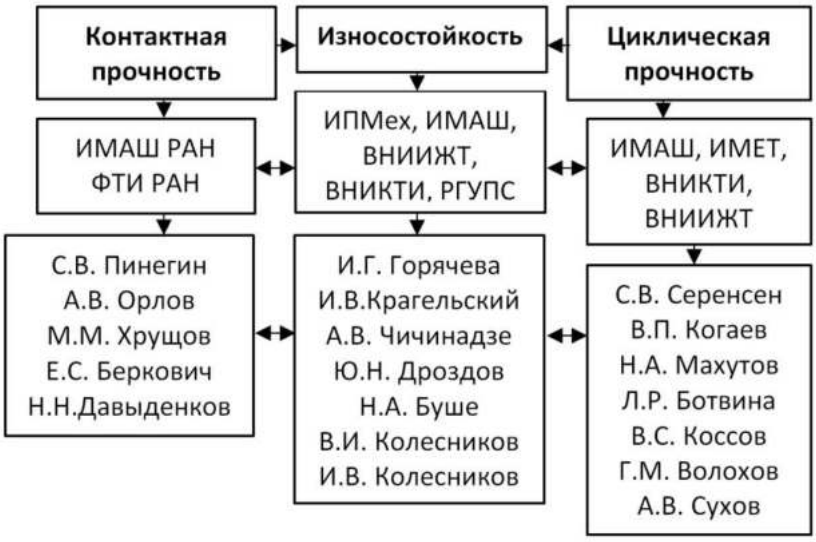


Рис. 3. Совместные разработки РАН - ОАО «РЖД» (1940 – 2021 гг.)

Фундаментальные и прикладные исследования по этим направлениям стали основой формирования целой серии нормативных документов (стандартов, руководств, справочников), на базе которых велись расчеты прочности, износостойкости и ресурса на стадиях проектирования, испытаний, производства, строительства и эксплуатации объектов подвижного состава и инфраструктуры железнодорожного транспорта [1, 2, 4].

3. Формирование обобщенных расчетных схем и расчетных случаев

С учетом п.п. 1, 2 наиболее сложной в научном плане и важной в практических приложениях оказывается проблема формирования и развития унифицированных, обобщающих методов исследований, расчетов и испытаний, затрагивающих одновременно взаимоувязанные типовые узлы и компоненты, механизмы повреждений, условия контактирования и нагружения [2, 3, 5].

В составе унифицированных расчетных уравнений, моделей и их параметров должны быть рассмотрены [5]:

- все основные виды силовых воздействий $Q_i(\tau)$ (м – механические; *t* – температурные; аг – аэрогидродинамические; с – сейсмические; в – вибрационные; эм - электромагнитные)

$$Q_i(\tau) = F_Q\left\{Q_{\text{м}}(\tau), Q_t(\tau), Q_{\text{аг}}(\tau), Q_{\text{с}}(\tau), Q_{\text{в}}(\tau), Q_{\text{эм}}(\tau)\right\}; \quad (1)$$

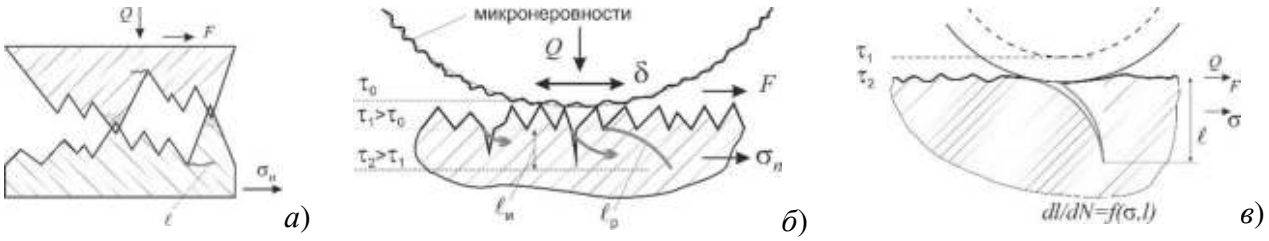
- воздействия внутренней рабочей и внешней сред $\Phi_i(\tau)$ (к – коррозия; э – эрозия; кв – кавитация; р - радиация)

$$\Phi(\tau) = F_\Phi\left\{\Phi_{\text{к}}(\tau), \Phi_{\text{э}}(\tau), \Phi_{\text{кв}}(\tau), \Phi_{\text{р}}(\tau)\right\}; \quad (2)$$

- реакции несущих элементов $R_i(\tau)$ на силовые воздействия и воздействия среды $\Phi(\tau)$

$$\left\{R(\tau), \Phi(\tau)\right\} = F\left\{Q_i(\tau), \Phi_i(\tau)\right\}. \quad (3)$$

В общем случае силовые воздействия (усилия давления - нормальные *Q* и горизонтальные трения *F*) в заданный момент времени τ создают соответствующие напряжения σ, деформации *e* и перемещения δ в зонах и вне зон контакта. Возникающие в разные моменты времени (τ_0, τ_1, τ_2) напряжения σ, деформации *e* и перемещения δ приводят к деформациям на микронеровностях поверхностей тела, к созданию промежуточных тел в зоне контакта (продуктов износа и микроразрушений, смазки), образованию начальных трещин *l* и их развитию по числу циклов нагружения *N* со скоростями *dl/dN* до полного разрушения при $l=l_{\text{р}}$ (рис. 4).



а) *б*) *в*)

Локальные процессы: контакт
$Q>0,\ F=0,\ \sigma\to 0,\ l\to 0$

Начальный рост трещин: износ + разрушение
$Q>>0,\ F>0,\ \sigma>0,\ l_и,\ l_р>0$

Магистральная трещина: контакт + износ + усталость + механика разрушения
$Q>0,\ F\to 0,\ \sigma>0,\ \delta>0,\ l_р>>0$

Рис. 4. Расчетные модели и параметры взаимодействия контактирующих тел

Для объектов железнодорожного транспорта характерны следующие определяющие исходные условия нагружения:

- однократное статическое $N_0=10^0$; τ_0 =0,01-0,05 часа;
- однократное динамическое $N_0=10^0$; $\tau << \tau_0$;
- длительное статическое $N_0=10^0$; $\tau >> \tau_0$;
- циклическое длительное $N_0=10^0$-10^{12}; $\tau =10^4$–$3\cdot 10^5$ час.

4. Определяющие уравнения для унифицированного анализа прочности и износостойкости

При анализе процессов деформирования, повреждения и разрушения в различных условиях и режимах контактного и бесконтактного воздействия с учетом переменного и повреждаемого поверхностного состояния подлежат формированию и решению следующие задачи [5]:

- определение номинальных и локальных напряженно-деформированных состояний $\{\sigma_n, e_n\}$ аналитическими методами сопротивления материалов, теорий упругости и пластичности или численными методами

$$\{\sigma_n, e_n\} = F_{\sigma,e}\{Q(\tau)/F(\tau), W(\tau)\}, \quad (4)$$

где $F(\tau)$, $W(\tau)$ - площадь и момент сопротивления в опасном сечении в момент τ , когда $F(\tau_0)\ge F(\tau)$, $W(\tau_0)\ge W(\tau)$;

- определение минимальных локальных напряжений $\sigma_{\max k}$ и деформаций $e_{\max k}$ в зонах концентрации

$$\{\sigma_{\max k}, e_{\max k}\} = F_k\{(\sigma_n, e_n), a_\sigma, m\}, \quad (5)$$

где a_σ - теоретические коэффициенты концентрации на микронеровностях или в зонах конструктивной концентрации ($a_\sigma \ge 1$); m - показатель упрочнения.

При степенной аппроксимации кривой деформирования ($0\le m\le 1$)

$$\sigma = \sigma_т (e/e_т)^m, \quad (6)$$

где $\sigma_т, e_т$ - предел текучести и деформация предела текучести (для упругого деформирования m=1, для идеального упругопластического деформирования m=0).

При контактных воздействиях на объектах типа «колесо-рельс» задачи о напряженно-деформированных состояниях решаются аналитическими и численными методами с определением сложных полей всех компонентов главных напряжений $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$ [2, 3, 5]. Для этих напряжений, так же, как и для напряжений по (4), (5) по I – IV классическим теориям прочности, определяются эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$.

Наиболее приемлемым с точки зрения объяснения разрушений в условиях высоких сжимающих контактных главных напряжений является III-я теория прочности - теория

касательных напряжений

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{III} = \tau(\sigma_1 - \sigma_3)/2\,. \qquad (7)$$

Максимальные сдвиговые деформации $\gamma_{\max}$ возникают на наклонных площадках, что определяет и последующее образование наклонных начальных поверхностных или подповерхностных трещин (см. рис. 4).

Номинальное и локальное пластическое деформирование в зоне контакта под действием сил (до максимальных величин) из нулевого (исходного) состояния создает (рис. 5) нелинейное изменение $Q = Q_{\max}$ и $F = F_{\max}$.

При разгрузке до Q=0 и F=0 возможно как упругое, так и неупругое деформирование до точки B. Возникшим деформациям e или γ соответствует внутреннее тепловыделение Δt .

Эксперименты показывают близкую к линейной связь между деформациями e и Δt

$$\Delta t = C \cdot e. \qquad (8)$$

Это означает, что поля деформаций при однородных напряжениях в зонах контакта, концентрации деформаций и трещин могут быть перестроены в поля температур как при однократном, так и при циклическом нагружении. При высоких скоростях однократного деформирования $de/d\tau$ локальные температуры могут возрастать на десятки градусов, что снижает сопротивление локальным деформациям и ведет как к росту деформаций e, так и к росту температур Δt [5].

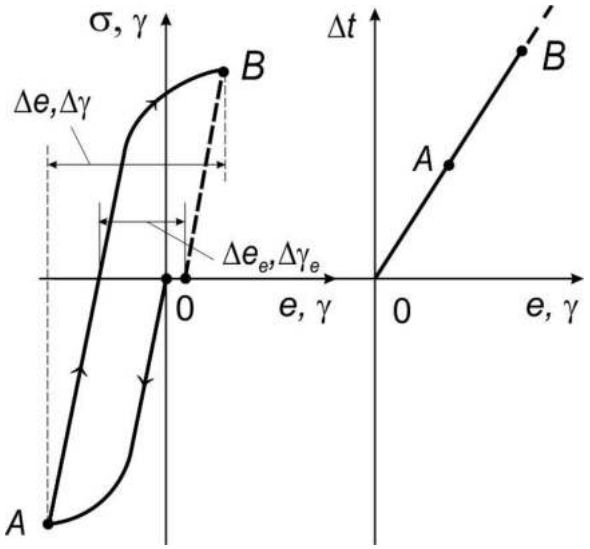


Рис. 5. Расчетная схема для анализа нелинейных и неизотермических эффектов при сложных воздействиях напряжений и деформаций до точки *A*

Циклическая долговечность N_0 (по моменту образования начальных поверхностных трещин $\ell_{\text{и}}$ по рис. 4) определяется для упругой Δe_e и пластической Δe_p составляющих полного размаха Δe деформаций степенным уравнением [5]

$$\Delta e_e \cdot N_0^{m_e} = C_e\,; \quad \Delta e_p \cdot N_0^{m_p} = C_p\,; \quad \Delta e_e + \Delta e_p = \Delta e\,, \qquad (9)$$

где m_p, m_e, C_e, C_p - характеристики материала, зависящие от предельной статической прочности и пластичности.

Циклическое нагружение может сопровождаться ростом температур на сотни градусов.

После образования в зонах контакта наклонных трещин $\ell_{\text{и}}$ при увеличении числа циклов $N > N_0$ их дальнейший рост $\ell_{\text{р}}$ описывается уравнениями линейной и нелинейной механики разрушения с учетом изотермичности и неизотермичности в зоне трещин [5]

$$dl/dN = C\Delta K^{n_p}\,, \qquad (10)$$

где C и n_p - характеристики материала и условий нагружения.

5. Заключение

Изложенные выше расчетные модели и определяющие выражения могут позволить с единых и унифицированных позиций рассматривать вопросы прочности, износостойкости и трещиностойкости типовых несущих элементов подвижного состава и инфраструктуры железнодорожного транспорта [1].

Эти вопросы традиционно решались как самостоятельные [3-5]. Специальные расчетно-экспериментальные исследования показывают выраженное взаимовлияние контактных и неконтактных воздействий в нелинейной и неизотермической постановке и являются предметом дальнейших согласованных разработок РАН и ОАО «РЖД» с участием их ведущих организаций и специалистов.

Библиографический список

1. Научные основы безопасности железнодорожного транспорта / С.А. Кобзева [и др.] / Многотомное издание «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научные аспекты». – М.: МГОФ «Знание», 2020. – 720 с.

2. **Горячева, И.Г.** Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева / М.: Наука, 2001. – 478 с.

3. **Колесников, В.И.** Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В.И. Колесников / РГУПС. – М.: Наука, 2003. – 279 с.

4. Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя / И.В. Колесников [и др.] / М.: ВИНИТИ РАН, 2021. – 168 с.

Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность / Н.А. Махутов / Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1 – 494 с., ч. 2 – 610 с.

УДК 621.643.414; 534.232 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_281

А. Н. Неверов, канд. техн. наук, (Московский государственный автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ))

РЕЗЬБОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

Аннотация. *Исследуются нелинейные свойства стержневых составных ультразвуковых колебательных систем (СУКС) при продольных колебаниях. Нелинейность СУКС обусловлена контактным взаимодействием элементов. В работе изучалась генерация высших гармоник в акустическом контакте при резьбовом соединении элементов СУКС на низких ультразвуковых частотах в режиме стоячей волны. Удалось наблюдать сигналы второй, третьей и пятой гармоник возбуждающего сигнала при субгармоническом возбуждении.*

Nonlinear properties of rod composite ultrasonic oscillatory systems (SCS) under longitudinal vibrations are investigated. The nonlinearity of SEX is due to the contact interaction of elements. The paper studied the generation of higher harmonics in acoustic contact with threaded connection of SEX elements at low ultrasonic frequencies in the standing wave mode. It was possible to observe the signals of the second, third and fifth harmonics of the exciting signal during harmonic excitation.

Ключевые слова: ультразвуковая колебательная система, акустический контакт, высшие гармоники, резьбовое соединение.

Keywords: ultrasonic oscillatory system, acoustic contact, higher harmonics, threaded connection.

Введение

При расчете составных колебательных систем технологического назначения, работающих на низких ультразвуковых частотах (до 100 кГц), акустический контакт между элементами предполагается, как правило, идеальным. Это предположение, однако, может быть принято без предварительного обоснования лишь для неразъемного соединения, когда элементы выполнены из одного прутка металла. При других способах соединения в системе возникают плоскости разъема, которые могут быть источниками дополнительных потерь упругой энергии и вносить в систему дополнительное реактивное сопротивление. Кроме того, акустический контакт шероховатых поверхностей обладает ярко выраженными нелинейными свойствами.

Указанные обстоятельства порождают некоторые другие свойства, которые ранее не обсуждались как неприемлемые для ультразвуковых колебательных систем технологического назначения. Перечислим некоторые из них:

- ✓ зависимость собственных частот и резонансных амплитуд колебаний составных систем от усилия стягивания их элементов;
- ✓ несоответствие расчетных и экспериментальных параметров;
- ✓ неудовлетворительная повторяемость параметров составных систем;
- ✓ различная реакция составных систем с одинаковой геометрией на одинаковое нагружение.

Эти черты присущи как составным колебательным системам, совершающим колебания одного типа – продольные, поперечные, крутильные – так и составным системам с преобразованием типа или поляризации колебаний.

В то же время теоретически и экспериментально давно показано, что контакт двух шероховатых поверхностей является источником упругой нелинейности [1-11], которая значительно больше объемной. Однако эти исследования проводились в другом частотном диапазоне (порядка нескольких мегагерц) в режиме бегущей волны.

В конце шестидесятых годов был предложен акустический метод измерения твердости [16, 17]. В связи с этим у специалистов по неразрушающему контролю возник интерес к исследованию свойств акустического контакта, в частности, как его динамической податливости на первой гармонике, так и нелинейных свойств – генерации высших гармоник [18]. Указанная задача решена для случая контакта сферического наконечника с плоской поверхностью материала. Нелинейность была обусловлена тем, что линейный размер области контакта пропорционален величине сжимающей силы в степени 2/3 [19, 20]. Обе поверхности считались гладкими.

В то же время реальные поверхности всегда шероховаты. Поэтому и акустический контакт реальных поверхностей всегда нелинеен. Параметры, определяющие нелинейные свойства контакта, зависят от усилия сжатия поверхностей. В работе [21] исследуется субгармоническое возбуждение осцилляторов с квадратичной и кубической нелинейностью. Аналогично возможно субгармоническое возбуждение систем с поверхностями акустического контакта.

Основные соотношения

В работе [22] показано, что зависимость между сближением контактирующих поверхностей u и стягивающей силой $F(u)$ нелинейна:

$$F(u) = ESb\,\nu H_{\max}^{-(n+\nu+1)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u^{n+\nu+1}}{(n+\nu)(n+\nu+2)}, \qquad (1)$$

где E – модуль упругости,

S – номинальная площадь контакта поверхностей,

Hmax – сумма максимальных высот,

b и ν – параметры опорной кривой контакта, $b = k_{\nu 1,2} b_1 b_2 \dfrac{(H\max_1 + H\max_2)^{\nu_1+\nu_2}}{H^{\nu_1}\max_1 \cdot H^{\nu_2}\max_2}; \nu = \nu_1 + \nu_2,$

b_1, ν_1 b_2 и ν_2 – параметры опорных кривых контактирующих поверхностей,

$H\max_1, H\max_2$ – их максимальные высоты неровностей,

$k_{\nu 1,2} = \frac{\nu_1 \cdot \nu_2}{\nu_1 + \nu_2} \cdot \frac{\Gamma(\nu_1)\Gamma(\nu_2)}{\Gamma(\nu_1 + \nu_2)}$, $\Gamma(x)$ – гамма-функция аргумента x.

Пусть заданными будут статическая сила P_0 и закон колебаний

$$u_{\sim} = u_m \cos \omega t \tag{2}$$

где $u_{\sim}$ – текущее синусоидальное смещение в контакте в момент времени t, u_m – амплитуда колебательного смещения в нем, ω – круговая частота колебаний.

Тогда смещение в контакте u будет представлять собой сумму статического смещения u_0 и синусоидального колебания с частотой ω и амплитудой u_m и может быть записано в виде:

$$u = u_0 (1 + m \cos \omega t) \tag{3}$$

где $m = \frac{u_m}{u_0}$. Будем считать, что акустический контакт не разрывается. Это выполняется при

$$m \le 1 \tag{4}$$

Таким образом, контакт может быть источником колебаний высших гармоник [23]. Подставив (3) в (1) и выполнив не сложные, но громоздкие преобразования, получаем с учетом (4) выражение для n-ой гармоники силы F_n:

$$F_n = \frac{\Gamma(\nu + 1)}{2^{n-1}(\nu + 1)^{n-1}\Gamma(n+1)\Gamma(\nu - n)} \left(\frac{F_1}{P_0}\right)^{n-1} F_1, \tag{5}$$

где F_1 и P_0 – амплитуда первой гармоники силы и статическое стягивание поверхностей контакта,

$\Gamma(x)$ – гамма-функции от соответствующих аргументов.

В [24] проведено исследование нелинейных свойств составных стержневых ультразвуковых колебательных систем с электромагнитным соединением элементов на низких ультразвуковых частотах в режиме стоячей волны. Амплитуды гармоник зависели от величины тока соленоида, амплитуды и частоты возбуждающего сигнала.

При резьбовом соединении волноводов предположения, сделанные при теоретическом исследовании, выполняются в меньшей степени, чем при электромагнитном. Это связано с тем, что при резьбовом стягивании контактирующие поверхности испытывают не только и даже не столько нормальные, но и – главным образом – тангенциальные механические напряжения. Поэтому на неровности поверхностей действуют перерезывающие силы, которые повышают продольную податливость контакта. Кроме того, при затягивании неровности поверхностей могут не только деформироваться, но и разрушаться, что приводит к искажению формы опорной кривой.

Экспериментальная установка

Блок – схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Колебательная система представляла собой два идентичных пакетных пьезопреобразователя, один из которых использовался как источник продольных упругих колебаний, а другой в качестве их приемника. Конструкция преобразователей подбиралась таким образом, чтобы они при расчете могли аппроксимироваться однородными стержнями. Характеристические сопротивления преобразователей были равны. Собственные частоты преобразователей составляли 22,60±0,05 кГц.

Преобразователь-источник крепился к неподвижным частям экспериментальной установки в узле продольных смещений. Он возбуждался гармоническим сигналом от ультразвукового генератора. К преобразователю-источнику при помощи резьбового соединения М 8×1 7H/6g присоединялся преобразователь-приемник. Момент затяжки создавался и контролировался пружинным динамометром на плече 10 см. Вся колебательная система располагалась вертикально. Частота возбуждающего сигнала определялась при помощи частотомера. Величина интегрального выходного сигнала фиксировалась электронным вольтметром. Величина сигнала каждой отдельно взятой гармоники

определялась анализатором спектра. Форма входного и выходного сигналов контролировались на экране двухлучевого осциллографа.

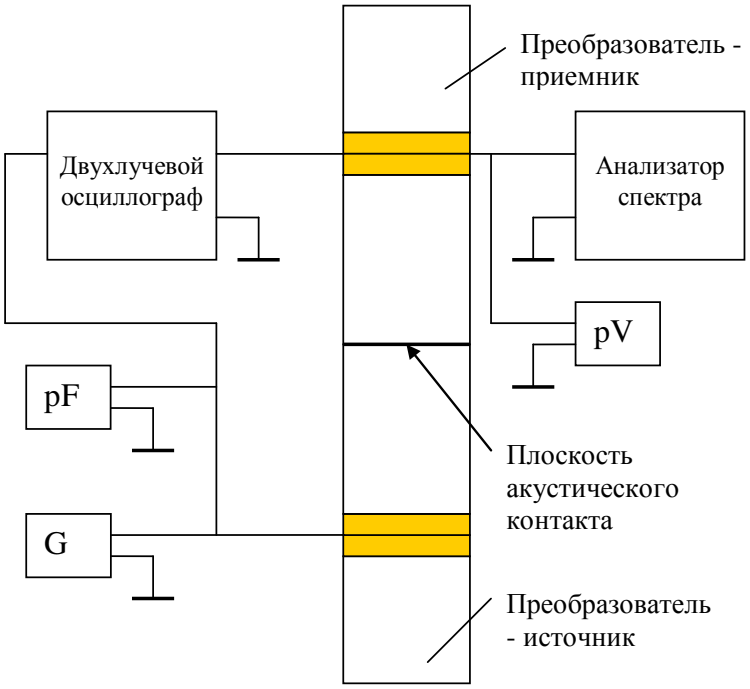


Рис. 1. Блок – схема экспериментальной установки

Результаты исследований

При возбуждении преобразователя - источника простым гармоническим сигналом акустический контакт на границе преобразователя — источника и преобразователя— приемника вследствие своей нелинейности генерирует сигналы высших гармоник. Если частота этих гармоник оказывается близкой к одной из собственных частот системы, эта гармоника попадает в резонанс, ее амплитуда должна быть достаточно велика.

Экспериментальные зависимости амплитуды выходного сигнала от момента затяга резьбового соединения преобразователей – источника и приемника и от амплитуды входного сигнала на первой гармонике приводится на рис. 2, а при субгармоническом возбуждении – на рис. 3 – 5.

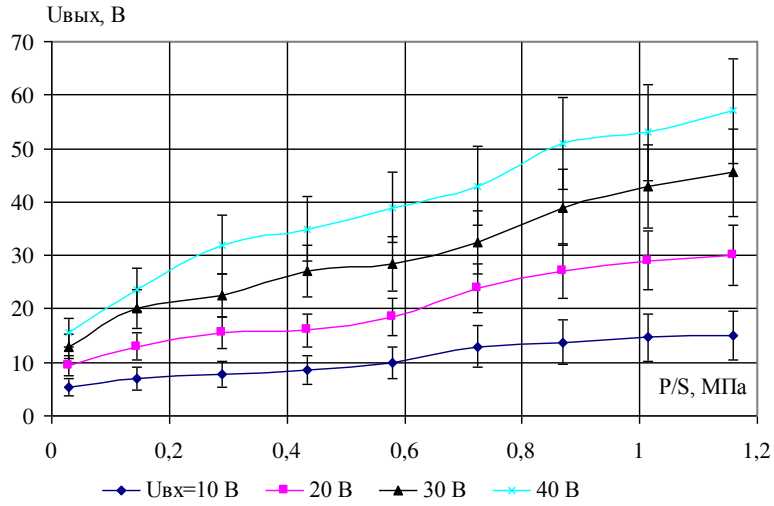


Рис. 2. Зависимость амплитуды выходного сигнала от усилия затяжки и амплитуды входного сигнала на первой гармонике; *S* – номинальная площадь контакта

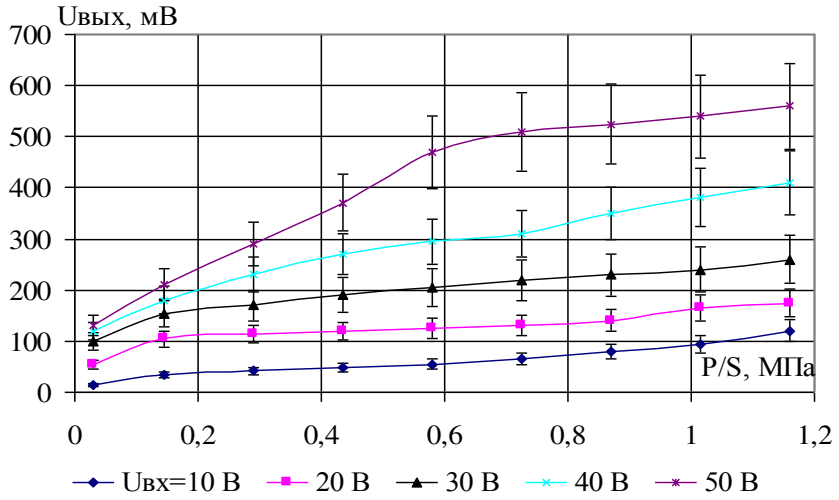


Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного сигнала от усилия затяжки и амплитуды входного сигнала на второй гармонике; *S* – номинальная площадь контакта

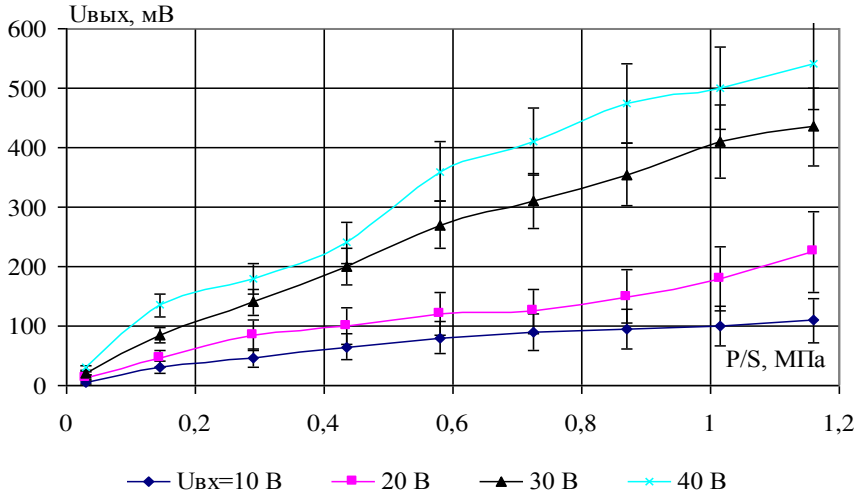


Рис. 4. Зависимость амплитуды выходного сигнала от усилия затяжки *P* и амплитуды входного сигнала на третьей гармонике *Uвх*; *S* – номинальная площадь контакта

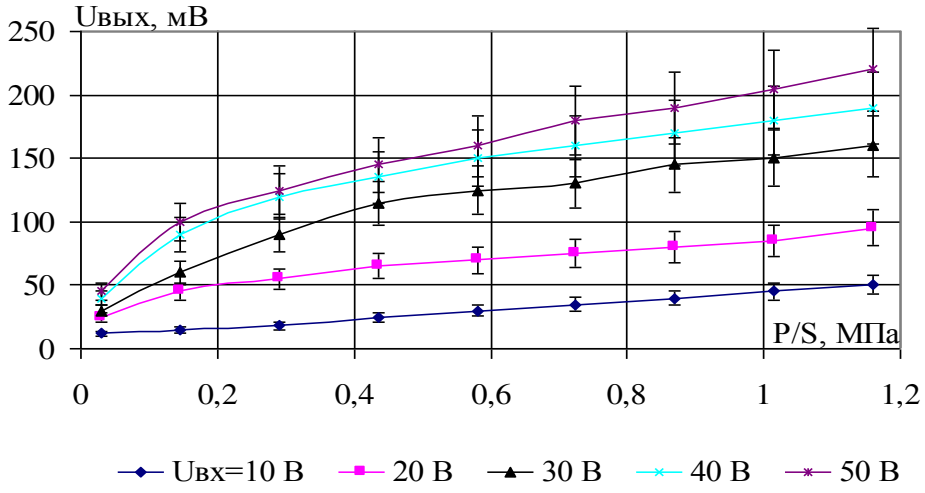


Рис. 5. Зависимость амплитуды выходного сигнала от усилия затяжки и амплитуды входного сигнала на пятой гармонике; *S* – номинальная площадь контакта

Амплитуда выходного сигнала при увеличении усилия стягивания элементов системы несколько повышается, а не убывает. Связано это, по-видимому, с тем, что при повышении усилия стягивания растет и сигнал первой гармоники, который для высших гармоник является генератором. Этот рост сигнала первой гармоники оказывается сильнее падения амплитуд гармоник. Этот аспект требует дальнейшего изучения.

Следует, видимо, отметить и то обстоятельство, что разброс результатов по амплитудам гармоник при резьбовом соединении волноводов значительно больше, чем при электромагнитном [24].

Результаты и выводы

Проведено экспериментальное исследование генерации высших гармоник резьбовым соединением волноводов на низких ультразвуковых частотах в режиме стоячей волны. При этих условиях сигналы высших гармоник усиливались за счет резонансных явлений. Нам удалось наблюдать сигналы второй, третьей и пятой гармоник возбуждающего сигнала.

Библиографический список

1. **Richardson, J.M.** Harmonic generation at unbounded interface. I. Planar interface between semi – infinite elastic media [Text] / J.M. Richardson // Int. J. Eng. Sci. – 1979. – v. 17. – №.1. – P. 73–85.

2. **Buck, O.** Acoustic harmonic generation at unbounded interface and fatigue cracks [Text] / O. Buck, W.L. Morris, J.M. Richardson // Appl. Phys. Lett. – 1978. – v. 33. – № 5. – P. 371–373.

3. **Руденко, О.В.** Нелинейные акустические свойства контактных поверхностей и возможности акустодиагностики статистических характеристик неровностей [Текст] / О.В. Руденко, Чинь Ань Ву // Акустический журнал. – 1994. – т. 40. – № 4. – С. 668–672.

4. **Руденко, О.В.** Распределение микровыступов шероховатой поверхности по данным акустических измерений [Текст] / О.В. Руденко, Чинь Ань Ву // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 1993. – т.34. – № 5. – С. 94–97.

5. **Северин, Ф.М.** Экспериментальное наблюдение нелинейности отражения звука от границы раздела твердых тел [Текст] / Ф.М. Северин, И.Ю. Солодов, Ю.Н. Шкуланов // Вестник МГУ Сер. 3. Физика. Астрономия. – 1988. – т. 29. – № 4. – С. 94–96.

6. **Ко Сел Лен** Экспериментальное наблюдение влияния контактной нелинейности на отражение объемных и распространение поверхностных акустических волн [Текст] / Ко Сел Лен, Ф.М. Северин, И.Ю. Солодов // Акустический журнал. – 1991. – т. 37. – № 6. – С. 1165-1169.

7. **Солодов, И.Ю.** «Хлопающая» нелинейность и хаос при колебаниях контактной границы твердых тел // [Текст] / И.Ю. Солодов, Чин Ан Ву // Акустический журнал. – 1993. – т. 39. – № 5. – С. 904-910.

8. **Ко Сел Лен** Экспериментальное наблюдение влияния контактной нелинейности на отражение объемных и распространение поверхностных акустических волн [Текст] / Ко Сел Лен, Ф.М. Северин, И.Ю. Солодов // Акустический журнал. – 1991. – т. 37. – № 6. – С. 1165–1169.

9. **Solodov, I.Yu.** Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection, and NDE [Text] / I.Yu. Solodov // Ultrasonics. – 1998. – v. 36. – P. 383–390.

10. **Баллад, Е.М.** Экспериментальное исследование эффектов контактной акустической нелинейности [Текст]: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.06: защищена 16.09.2004 / Баллад Евгений Маркович. М. – 2004. – 24 с.

11. **Коробов, А.И.** Влияние давления на нелинейное отражение упругих волн от границы двух твердых сред [Текст] / А.И. Коробов, Н.В. Ширгина, А.И. Кокшайский // Акустический журнал. – 2015. – т. 61. – № 2. – С. 182–190.

12. **Крагельский, И.А.** Основы расчетов на трение и износ. [Текст] / И.А. Крагельский, М.Н. Добычин, В.А. Комбалов. – М.: Машиностроение. – 1977. – 525 с.

13. **Захаров, В.И.** Расчет и конструирование элементов резьбовых соединений магнитострикционных преобразователей с настроенными колебательными системами [Текст] /

В.И. Захаров // Применение ультразвука в технологии машиностроения. Труды НИТИ. – вып. VIII. – часть I. – М. – 1964. – С. 39–48.

14. **Мечетнер, Б.Х.** Концентраторы-инструменты для ультразвуковой обработки, способы их крепления [Текст] / Б.Х. Мечетнер. – М.: НИИМАШ. – 1965. – 54 с.

15.**Kazantsev, V.F.** Oscillation of rod pressed to elastic surface [Text] / V.F. Kazantsev // Proc. Int. Congr. Acoust., Liege, 7-14 sept,1965, L 48–5.

16. **Kleesattel, C.** The contact – impedance meter – 1 [Text] / C. Kleesattel, G.M.L. Gladwell // Ultrasonics. – 1968. – July. – № 3. – P. 175-180.

17. **Kleesattel, C.** The contact – impedance meter – 2 [Text] / C. Kleesattel, G.M.L. Gladwell // Ultrasonics. – 1968. – October. – № 4. – P. 244-251.

18. **Ланге, Ю.В.** О динамической гибкости сухого точечного контакта[Текст] / Ю.В. Ланге, И.И. Теумин // Дефектоскопия. – 1971. – № 2. – С. 49-60.

19. **Ландау, Л.Д.** Теория упругости [Текст] / Л.Д. Ландау, И.М. Лифшиц. – М.: Наука. – 1987. – 248 с.

20. **Галин, Л.А.** Контактные задачи теории упругости [Текст] / Л.А. Галин. – М.: – Наука, – 1980. – 304 с.

21. **Nayfeh, A.H.** The Response of Single Degree of Freedom System with Quadratic and Cubic Non-linearities to a Subharmonic Exitation [Text] / A.H. Nayfeh // Journal of Sound and Vibration. – 1983. – V. 89. – № 4. – P. 457 – 470.

22. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов / Э. Д. Браун [и др.]; под ред. А. В. Чичинадзе – М.: Наука и техника. – 1995. – 778 с.

Неверов, А.Н. О нелинейности акустического контакта в составных стержневых колебательных системах. Электронный журнал "Техническая акустика", http://ejta.org, 2014.– 10.

УДК 517.977 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_287

В.Н. Ушаков, член-корреспондент РАН, **П.Д. Лебедев,** канд. физ.-мат. наук, **А.А. Ершов,** канд. физ.-мат. наук, **А.В. Ушаков** (Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН)

О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИГР

Аннотация. *В работе приведены постановки общих задач теории управления и теории дифференциальных игр. Перечисляются как стандартные, так и задачи с необычной постановкой. Приведён пример конкретной задачи по управлению механической системой, состоящей из тележки и установленного на ней обратного маятника. Задача состоит в приведении этой системы в заданное состояние при условии неизвестного коэффициента трения.*

The paper presents statements of general problems of control theory and differential game theory. Both standard and unusual tasks are listed. An example of a specific task for controlling a mechanical system consisting of a trolley and a reverse pendulum mounted on it is given. The task is to bring this system to a given state under the condition of an unknown coefficient of friction.

Ключевые слова: управляемая система, управление в условиях неопределённости, обратный маятник, коэффициент трения.
Keywords: controlled system, control under uncertainty, reverse pendulum, coefficient of friction.

Теория управления и теория дифференциальных игр интенсивно развивались во второй половине XX века. В нашей стране (СССР) это развитие происходило в значительной степени под влиянием исследований Л.С. Понтрягина, Н.Н. Красовского и их научных школ. В

последующее (за второй половиной XX века) время исследования Н.Н. Красовского получили развитие и были дополнены новыми научными направлениями в научных школах Ю.С. Осипова и А.Б. Куржанского. На высоком уровне находятся и теоретические исследования, проводимые в Институте математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН. На их основе изучаются и решаются как теоретические задачи, так и задачи, имеющие прикладную направленность. Представим некоторые из этих задач.

Итак, пусть на промежутке времени $[t_0,T]$ задана управляемая система Σ

$$\frac{dx}{dt} = f(t,x,u), \quad t \in [t_0,T], \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad u \in P; \tag{1}$$

здесь t — время,

x — фазовый вектор системы Σ,

u — вектор управления,

P — ограниченное и замкнутое множество в $\mathbb{R}^p$, $f(t,x,u)$ — n-мерная вектор-функция на $[t_0,T]\times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p$.

Если для системы Σ заданы начальная точка $x^{(0)}$ в $\mathbb{R}^n$, отвечающая моменту t_0 и некоторое управление $u(t) \in P$, $t \in [t_0,T]$, то им соответствует некоторое решение уравнения (1) $x(t)$, $t \in [t_0,T]$

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(t,x(t),u(t)), \quad x(t_0) = x^{(0)}, \quad t \in [t_0,T],$$

которое мы называем движением системы Σ, выходящим из точки $x^{(0)}$ и порождённым управлением $u(t) \in P$, $t \in [t_0,T]$.

Задача 1 (о сближении системы Σ с M). *Пусть в* $\mathbb{R}^n$ *заданы начальная точка* $x^{(0)}$ *и целевое множество* M *для системы* Σ. *Требуется выделить управление* $u^*(t) \in P$, $t \in [t_0,T]$, *порождающие движение* $x^*(t)$, $x^*(t_0) = x^{(0)}$, $t \in [t_0,T]$ *системы* Σ, *удовлетворяющее* $x^*(T) \in M$.

В более общей постановке задача 1 о сближении Σ с M в момент T формулируется так.

Задача 1 (о сближении системы Σ с M в общей постановке).

Пусть в $\mathbb{R}^n$ *заданы стартовое множество* $X^{(0)}$ *и целевое множество M для системы* Σ. *Требуется выделить в* $X^{(0)}$ *точку* $x^{(0)}$ *и управление* $u^*(t) \in P$, $t \in [t_0,T]$, *порождающие движение* $x^*(t)$, $x^*(t_0) = x^{(0)}$, $t \in [t_0,T]$ *системы* Σ, *удовлетворяющее* $x^*(T) \in M$.

Множество M в задаче 1 также называют целевым множеством. На рис. 1 изображены множества $X^{(0)}$ и M, а также движение системы Σ, удовлетворяющее условию $x^*(T) \in M$.

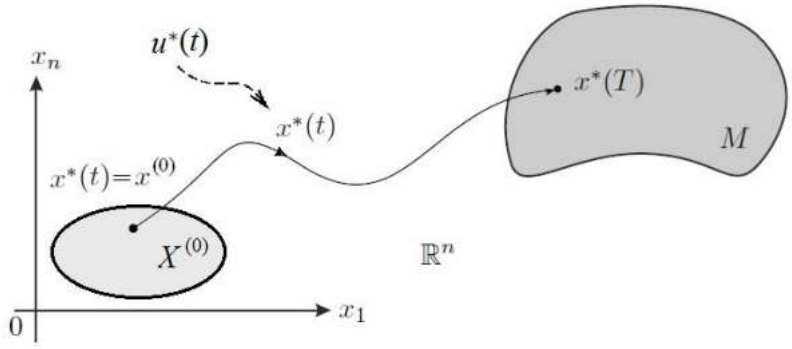


Рис. 1. Движение $x^*(t)$ системы Σ, удовлетворяющее условиям задачи 1

Рассмотрим на промежутке времени $[t_0,T]$ управляемую систему Σ_2

$$\frac{dx}{dt} = f(t,x,u,v), \quad t \in [t_0,T], \quad x \in \Phi, \quad u \in P, \quad v \in Q; \tag{2}$$

здесь t — время,

x — фазовый вектор,

$\Phi \subset \mathbb{R}^n$ — фазовое ограничение,

u — вектор управления,

P и Q — ограниченные и замкнутые множество в $\mathbb{R}^p$ и $\mathbb{R}^q$, $f(t,x,u,v)$ — n-мерная вектор-функция на $[t_0,T]\times \mathbb{R}^n \times P \times Q$.

Считается, что помеха v может быть реализована в виде функции $v(t,x) \in Q$, но её реализации в моменты $t \in [t_0,T]$ неизвестны лицу, формирующему управление u в моменты $t \in [t_0,T]$.

Задача 2 (о сближении системы Σ_2 с M при наличии помех и фазовых ограничений — игровая задача о сближении системы Σ_2 с M). *Пусть в множестве* Φ *заданы начальная точка* $x^{(0)}$ *и целевое множество* M. *Требуется построить управление* $u^*(t,x) \in P$, *которое при любой помехе* $v(t,x) \in Q$ *обеспечивает соблюдение фазового ограничения и попадание движения* $x^*(t)$, $x^*(t_0) = x^{(0)}$ *системы* Σ_2 *на* M: $x^*(t) \in \Phi$ *при* $t \in [t_0,T]$ и $x^*(T) \in M$.

На рис. 2 изображены возможные движения системы Σ_2, порождённые управлениями, разрешающими задачу 2.

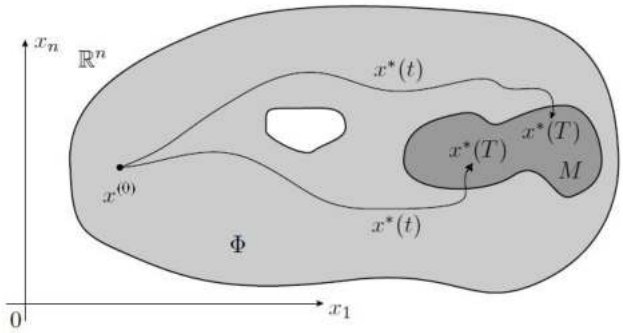


Рис. 2. Движения $x^*(t)$ системы Σ_2, удовлетворяющие условиям задачи 2

Задачи 1 и 2 просты по постановке, но эта простота кажущаяся. Так, задача 2 формализована в работах Н.Н. Красовского и А.И. Субботина [1–4] как позиционная дифференциальная игра сближения-уклонения, в которой помеха $v(t,x)$ трактовалась как управление игрока-противника, препятствующего игроку, владеющему выбором управления $u = u(t,x)$ и решающего задачу 2. Аккуратная формализация задачи 2 и разработка разрешающих конструкций в этой задаче потребовали создания глубокой теории и разработки нетривиальных алгоритмов [5, 6].

Ключевым элементом в этих разрешающих конструкциях задач 1 и 2 является множество достижимости $X(t,t_0,X^{(0)})$ в $\mathbb{R}^n$ — множество всех точек x в $\mathbb{R}^n$, в которые может прийти система Σ в момент $t \in [t_0,T]$ под действием всевозможных управлений $u(\tau) \in P$, $\tau \in [t_0,t]$, стартуя из начального множества $X^{(0)} \subset \mathbb{R}^n$ (рис. 3).

Действительно, обратившись к задаче 1, заключаем, что для стартового множества $X^{(0)}$ системы Σ задача 1 разрешима тогда и только тогда, когда $X(T,t_0,X^{(0)})\cap M\neq\varnothing$.

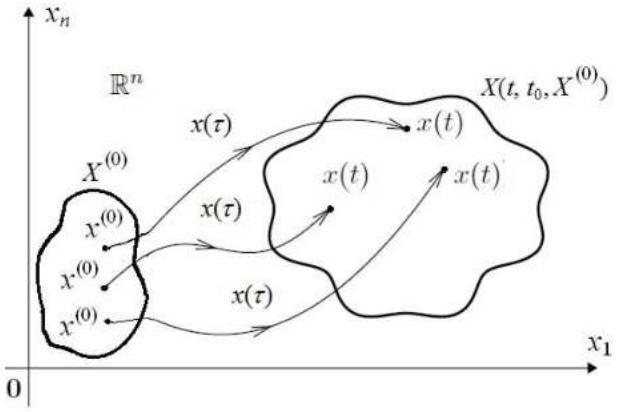


Рис. 3. Множество достижимости

Множества $X(t,t_0,X^{(0)})$, $t\in[t_0,T]$ есть множества в фазовом пространстве $\mathbb{R}^n$ точек x. Часто возникает потребность дополнить точки x моментами t, в которые они рассматриваются, и рассматривать пространство $[t_0,T]\times\mathbb{R}^n$ позиций (t,x). Тогда множествам достижимости $X(t,t_0,X^{(0)})$ в пространстве $\mathbb{R}^n$ ставятся в соответствие множества $\left(t,X(t,t_0,X^{(0)})\right)$ в пространстве $[t_0,T]\times\mathbb{R}^n$.

Из множеств $\left(t,X(t,t_0,X^{(0)})\right)$, $t\in[t_0,T]$ можно «слепить» *интегральную воронку* системы Σ в $[t_0,T]\times\mathbb{R}^n$:

$$X(t_0,X^{(0)})=\bigcup_{t\in[t_0,T]}\left(t,X(t,t_0,X^{(0)})\right).$$

Интегральная воронка $X(t_0,X^{(0)})$ есть множество всех позиций (t,x) системы Σ на промежутке $[t_0,T]$, которых может достичь, стартуя из множества $(t_0,X^{(0)})$ (рис. 4).

Интегральная воронка $X(t_0,X^{(0)})$ — такой же важный элемент в разрешающих конструкциях задач 1 и 2, как и множество достижимости $X(t,t_0,X^{(0)})$.

С задачами о сближении тесно переплетаются задачи о накрытии. Сформулируем одну из задач о накрытии.

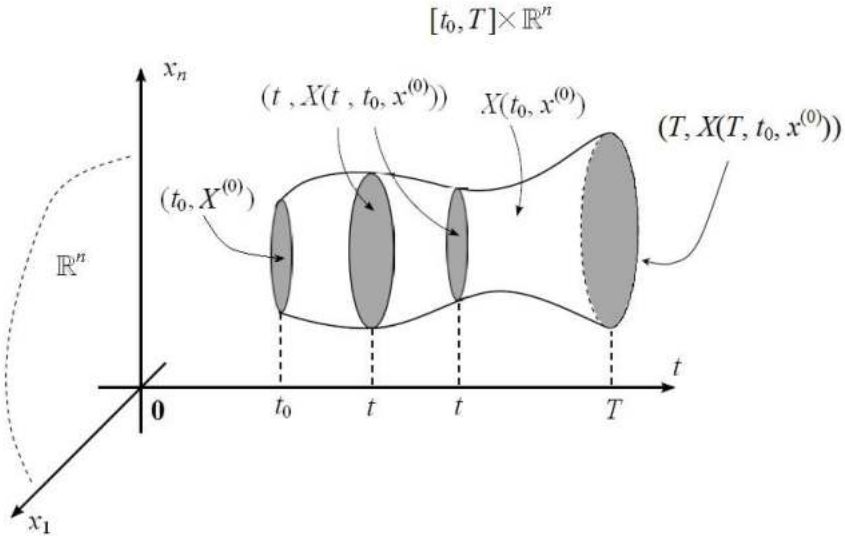


Рис. 4. Интегральная воронка

Задача 3 (О накрытии множества M интегральными воронками системы Σ). *Пусть заданы начальная точка* $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$ *и целевое (открытое и замкнутое) множество* M *в* $\mathbb{R}^n$. *Требуется найти минимальную* ε*-окрестность* $X_\varepsilon^{(0)} = B(x^{(0)}, \varepsilon) = \{x \in \mathbb{R}^n : \| x - x^{(0)} \| \le \varepsilon\}$ *точки* $x^{(0)}$, *удовлетворяющую включению* $M \subset X(T, t_0, X_\varepsilon^{(0)})$.

К задаче 3 примыкает следующая задача о покрытии множества M шарами в $\mathbb{R}^n$.

Задача 4 (о покрытии множества M шарами)**.** *Пусть задано конечное* $R > 0$. *Требуется выделить покрытие множества* M *минимальным количеством шаров* $B(z^{(i)}, R) \subset \mathbb{R}^n$, $i = 1, 2, ..., I$, *удовлетворяющих включениям* $z^{(i)} \in X(T, t_0, X^{(0)})$, $i = 1, 2, ..., I$.

Допустим, что мы решили задачи 3 и 4 и сконструировали минимальное покрытие множества M шарами $B(z^{(i)}, R)$, $i = 1, 2, ..., I$ (рис. 5). Тогда возникает следующая задача управления.

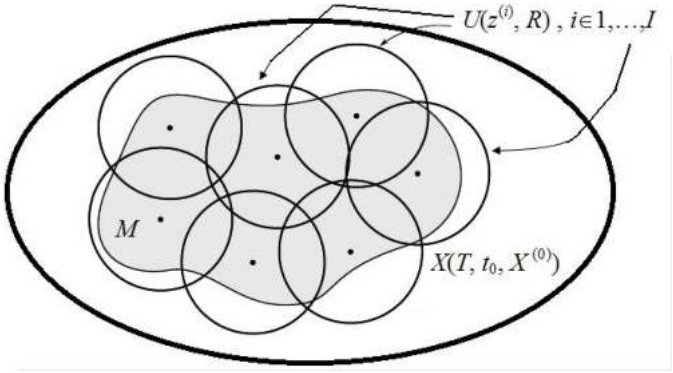


Рис. 5. Накрытие целевого множества M шарами $B(z^{(i)}, R)$, $i = 1, 2, ..., I$

Задача 5 (о приведении движений на центры шаров покрытия). *Требуется в множестве* $X^{(0)}$ *выделить* I *точек* $x_i^{(0)}$, $i = 1, 2, ..., I$, *для каждой из которых существует управление* $u^{(i)}(t)$ *на* $[t_0, T]$, *порождающее движение* $x^{(i)}(t)$, $x^{(i)}(t_0) = x_i^{(0)}$, *приходящее в момент* T *в точку* $z^{(i)}$.

На этом закончим перечисление некоторых возможных задач управления и дифференциальных игр и рассмотрим конкретный пример решения задачи 2.

Пример 1. Задана механическая управляемая система — обратный маятник с точкой подвеса, находящейся на тележке, передвигающейся по горизонтальной плоскости [7]. На тележку воздействует в горизонтальном направлении тяговое усилие величины F. Обратный маятник подвержен силе гравитации mg, приложенной к его центру тяжести, а также находится под действием горизонтальной $\dot{H}$ и вертикальной $\dot{V}$ составляющих сил реакции в опорной точке маятника; m — масса маятника, m^* — масса тележки, g — гравитационная постоянная (рис. 6).

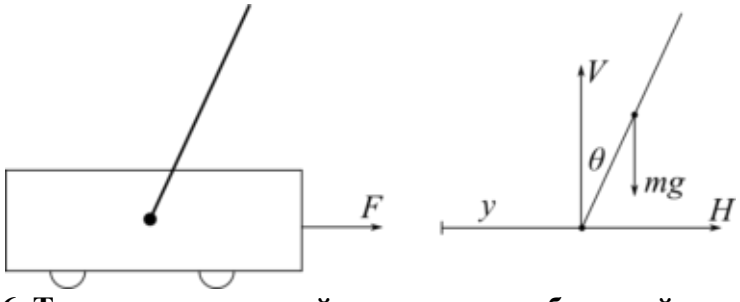


Рис. 6. Тележка и силы, действующие на обратный маятник

Полагаем L — расстояние между центром тяжести маятника и его опорной точкой, y — смещение опорной точки маятника, α — угол наклона маятника по отношению к вертикальной оси, I — момент инерции маятника относительно центра массы.

Введем переменные $x_1 = \alpha$, $x_2 = \alpha$, $x_3 = y$, $x_4 = y$.

Полагаем также $u = u(t)$ — величина тягового усилия $\dot{F}(t)$ на промежутке $[t_0, T]$, где $|\dot{F}(t)| \le \mu$, μ — заданное положительное число; k — коэффициент трения горизонтальной поверхности.

Считаем, что $u = u(t)$ находится в распоряжении первого игрока и может выбираться как позиционное управление $u(t,x)$ ($|u(t,x)| \le \mu$), где $(t,x) = (t, x_1, x_2, x_3, x_4)$ — позиция системы тележка-маятник. Считаем также, что коэффициент трения $k = k(t)$, который рассматриваем как управление $v = v(t) = k(t)$ второго игрока, неизвестен первому игроку. Мы не исключаем, что он может быть реализован как функция $k(t) = v(t, x(t))$, где функция $v(t,x)$ удовлетворяет неравенству $|v(t, x(t))| \le \zeta$, а $x(t)$ — движение системы (4.1), ζ — заданное положительное число.

При таких обозначениях уравнение системы тележка-маятник принимает вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\dfrac{1}{\Delta(x_1)}\{(m+m^*)mgL\sin x_1 - mL\cos x_1(u + mLx_2^2 \sin x_1 - vx_2)\}, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = -\dfrac{1}{\Delta(x_1)}\{-mL\cos x_1 mgL\sin x_1 + (I+mL^2)(u + mLx_2^2 \sin x_1 - vx_2)\}; \end{cases} \tag{3}$$

здесь $\Delta(x_1) = (I + mL^2)(m + m^*) - m^2L^2\cos x_1$.

Рассматривается игровая задача о сближении системы (4.1) с целевым множеством $M = \{x \in \mathbb{R}^4 : \| x \|^* \le 0.5 \text{ м}\}$ ($x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$) при наличии стационарного фазового ограничения $\Phi = [t_0, T] \times \Omega$, $t_0 = 0$, $T = 2.5$, $\Omega = \{x \in \mathbb{R}^4 : -0.3\,{}^{\text{рад}}\!/_{\text{сек}} \le x_2 \le 0.3\,{}^{\text{рад}}\!/_{\text{сек}},\ -0.5\,{}^{\text{м}}\!/_{\text{сек}} \le x_4 \le 0.5\,{}^{\text{м}}\!/_{\text{сек}}\}$ со следующими значениями входящих в (4.1) параметров: $m = 0.25$ кг, $m^* = 2$ кг, $g = 9.81\,{}^{\text{м}}\!/_{\text{сек}^2}$, $L = 1$ м, $I = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $x^{(0)} = (-0.257 \text{ рад.}, 0.048\,{}^{\text{рад}}\!/_{\text{сек}}, 0.050 \text{ м}, -0.028\,{}^{\text{м}}\!/_{\text{сек}}) \in \mathbb{R}^4$, $Q = [0\,{}^{\text{кг}}\!/_{\text{мсек}}, 0.39\,{}^{\text{кг}}\!/_{\text{мсек}}]$, $P = [-1\text{н}, 1\text{н}]$, $Q = \{v^{(l)} \in Q : v^{(l)} = l \cdot 0.03,\ l \in \overline{1,13}\}$, $P = \{u^{(s)} \in P : u^{(s)} = s \cdot 0.25\text{н},\ s \in \overline{-4,4}\}$.

Здесь обозначено

$$\| x \|^* = \sqrt{L^2 \cdot x_1^2 + \frac{9.81}{g} \cdot L^3 \cdot x_2^2 + x_3^2 + \frac{9.81}{g} \cdot L \cdot x_4^2}\ .$$

Вычислить точно множества достижимости и интегральную воронку рассматриваемой игровой задачи о сближении для системы (4.1) не представляется возможным, поэтому производится их приближенное вычисление методом Эйлера [6], а затем вычисляется разрешающее управление $u(t,x)$ согласно стратегии экстремального прицеливания Н.Н. Красовского [3].

Представим графическое изображение результатов математического моделирования решения примера 1 на рис. 7–9.

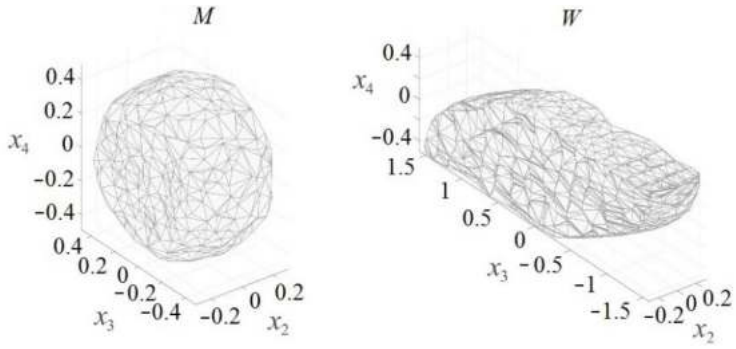


Рис. 7. Целевое множество M и множество разрешимости W — множество всех начальных точек $x^{(0)}$, из которых возможно приведение системы (3) на целевое множество

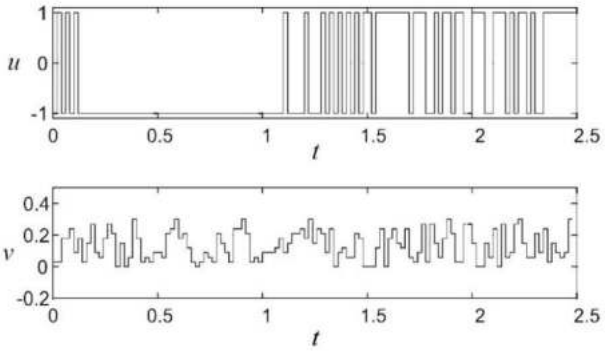


Рис. 8. Реализации разрешающего управления и помехи

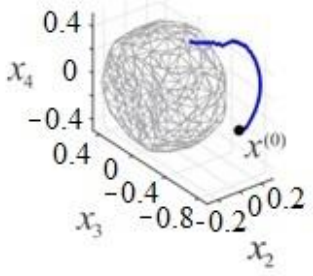


Рис. 9. Движение системы (3), приходящее на целевое множество

Библиографический список

1. **Красовский, Н.Н.** Игровые задачи динамики. I / Н.Н. Красовский // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1969. № 5. С. 3–12.

2. **Красовский, Н.Н.** Смешанное управление в дифференциальной игре / Н.Н. Красовский, А.И. Субботин // Докл. АН СССР. 1969. Т. 188, № 4. С. 715–747.

3. **Красовский, Н.Н.** Позиционные дифференциальные игры / Н.Н. Красовский, А.И. Субботин. М.: Наука, 1974. 456 с.

4. **Красовский, Н.Н.** К задаче унификации дифференциальных игр / Н.Н. Красовский // Докл. АН СССР. 1976. Т. 226, № 6. С. 1260–1263.

5. **Тарасьев, А.М.** О построении стабильных мостов в минимаксной игре сближения-уклонения / А.М. Тарасьев, В.Н. Ушаков // Деп. в ВИНИТИ, № 2454-83. Свердловск, 1983. 61 с.

6. **Тарасьев, А.М.** Об одном вычислительном алгоритме решения игровых задач управления / А.М. Тарасьев, В.Н. Ушаков, А.П. Хрипунов // Прикл. математика и механика. 1987. Т. 51, вып. 2. С. 216–222.

7. **Халил, Х.К.** Нелинейные системы, 3-е изд. / Х.К. Халил. Москва-Ижевск. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ин-т компьютерных исследований. 2009. 829 с.

УДК 621.891+06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_294

П.В. Харламов, канд. техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР ФРИКЦИОННОГО ПЕРЕНОСА НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОПЛАКИРОВАНИЯ

Аннотация. *Приводится изучение состояния поверхности стальных образцов (роликов) после трибологических испытаний с осуществлением модифицирования рабочих поверхностей путем нанесения на поверхности трения твердых плакирующих материалов. Данный способ особенно актуален для фрикционных подсистем фрикционной механической системы «колесо - рельс», где необходимо снизить трение между гребнем колеса и боковой поверхностью головки рельса для предотвращения вкатывания колеса на головку рельса, а также сопротивления движению поезда в кривых, где сложные условия эксплуатации тягового подвижного состава. От надежности работы и долговечности вышеназванных узлов трения зависит безопасность и эффективность эксплуатации железнодорожного подвижного состава. Морфология поверхности исследовалась с помощью системы анализа поверхности интерференционного микроскопа и сканирующего (растрового) электронного микроскопа с приставкой энергодисперсионного анализатора.*

A study of the surface condition of steel samples (rollers) after tribological tests with modification of working surfaces by applying hard cladding materials on friction surfaces is given. This method is especially relevant for friction subsystems of the wheel-rail friction mechanical system, where it is necessary to reduce friction between the wheel ridge and the side surface of the rail head in order to prevent the wheel from rolling onto the rail head, as well as resistance to train movement in curves where the operating conditions of the traction rolling stock are difficult. Safety and efficiency of railway rolling stock operation depends on reliability of operation and durability of said friction units. Surface morphology was investigated using an interference microscope surface analysis system and a scanning (raster) electron microscope with an energy dispersion analyzer prefix.

Ключевые слова: вторичные структуры, модификатор трения, спектр элементного состава, поверхность терния, адгезия, металлоплакирование
Keywords: secondary structures, friction modifier, elemental composition spectrum, thorium surface, adhesion, metal plating

От уровня взаимовлияния динамики фрикционных и механических подсистем зависят безопасность эксплуатации транспортной системы, а также стабильность работы фрикционного контакта и устойчивость фрикционной механической системы [1-4].

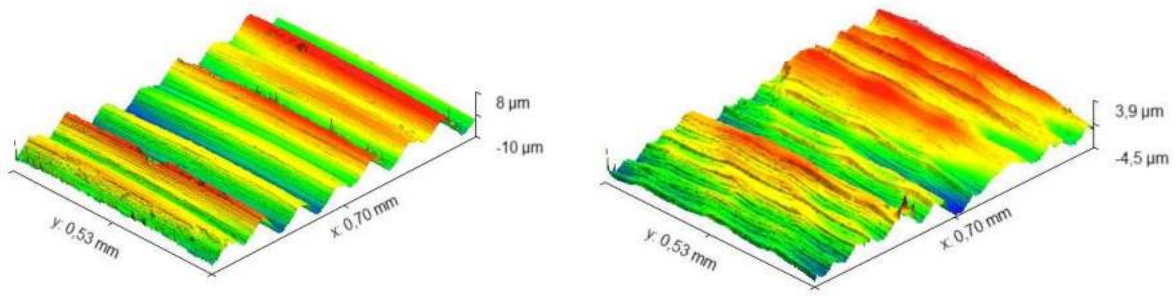
С целью установления механизма переноса металлоплакирующего модификатора трения [4-7], а также анализа его влияния на микрорельеф поверхности трения проводилось изучение состояния поверхности стальных образцов (роликов) после трибологических испытаний. Морфология поверхности исследовалась с помощью системы анализа поверхности (интерференционного микроскопа – оптического профилометра «NewView-600» фирмы ZYGO) [8].

В соответствии с методикой [9] испытания проводились при нормальных климатических условиях. Перед проведением испытаний был выполнен требуемый [8,9] ряд настроек профилометра. Каждый образец исследовался в 3-х точках, расположенных под 120^0 и вычислялось среднее значение шероховатости Ra. Исходные ролики имели среднюю шероховатость Ra ср = 3,325 мкм.

Поверхность роликов исследовалась после трибологических испытаний на машине трения типа Амслер ИИ-5018 по схеме «ролик-ролик» при установке в приводе зубчатых шестерен обеспечивающих проскальзывания 0% образцов. Диаметр контактирующих

поверхностей подбирался таким образом, чтобы обеспечить величину проскальзывания в контакте от 2 до 3% Ролики приводится во вращение с заранее установленной частотой вращения 130 об/мин. Нормальная нагрузка на образцы составляла 192-195 Н. Модификатор трения подавался контактно-ротапринтным способом в горизонтальной плоскости, исключая вертикальное давление на образцы, с обеспечением подачи перпендикулярно оси вращения ролика.

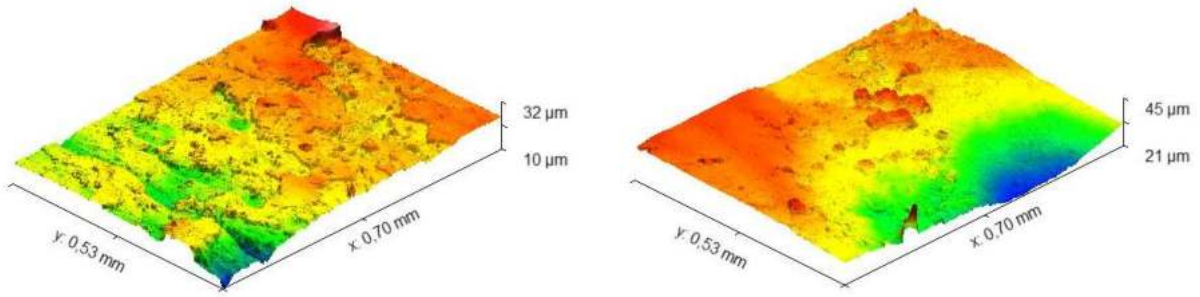
Морфология базовой поверхности контр тел образцов представлена на рисунке 1. Как видно из рисунка поверхность тел представлена чередующимися выступами и впадинами, распределенными по поверхности равномерно, что соответствует профилю резца токарного станка, используемого при изготовлении образцов.



а) б)

Рис. 1. Поверхности трения стальных образцов до обработки модификатором трения
а) верхний образец; *б)* нижний образец

На образцах были проведены серии экспериментов по нанесению модификатора трения с реализацией технологии металлоплакирования [5,6]. Каждый раз материал подавался на новую дорожку трения. В качестве материала модификатора трения был выбран алюминий различной твердости. Для анализа работы модификатора трения в экстремальных условиях во фрикционный контакт базовых поверхностей была осуществлена подача загрязнителя (рисунок 2), в качестве которого использовалось трансмиссионное масло. После снижения коэффициента трения в контакте до 0,07 при нанесении загрязнителя была осуществлена подача материала модификатора трения в виде мягкого электротехнического алюминия АД0, что привело к росту коэффициента трения до 0,17 и стабилизации этого значения на всем протяжении подачи модификатора. Средняя шероховатость участков составила Ra ср = 2,96 мкм, что ниже значения базовой поверхности.



а) б)

Рис. 2. Поверхности трения образцов после нанесения масляного загрязнителя и материала модификатора *а)* верхний образец; *б)* нижний образец

Подача твердого алюминия при аналогичных условиях не значительно повлияла на изменение коэффициента трения после нанесения загрязнителя. Можно предположит, что эффективная работа модификатора трения в виде мягкого алюминия обусловлена лучшим нанесение на поверхность за счет своих физико-механических свойств, уменьшением шероховатости поверхности, что способствуют вытеснению загрязнителя с поверхности

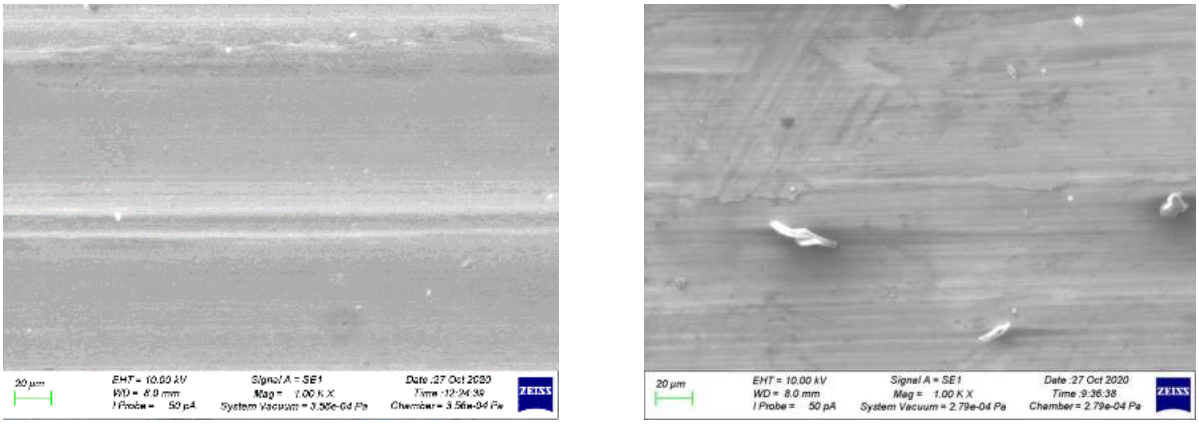
образцов за счет уменьшения невыдавливаемых объемов и увеличению коэффициента трения за счет увеличения фактической площади касания в трибоконтакте.

Наличие достаточного объема материала модификатора на поверхности верхнего образца объясняется наличием прочной химической связи между компонентами поверхности образца и материала модификатора трения, что подтверждает теоретическое моделирование при выполнении квантово-химических расчетов адгезии и когезии в различных металлических системах [5].

Исследования микроструктуры, топографии, качественного и количественного состава модифицированных покрытий проводились с использованием сканирующего (растрового) электронного микроскопа (SEM) Zeiss EVO MA 18 с приставкой энергодисперсионного (ЭДС) анализатора X-Max 50N и программного обеспечения AZtec.

В микроскопе SEM для формирования изображения или исследования образца используется пучок электронов.

Поверхности верхнего №1 и нижнего №2 образцов являются базовыми поверхностями без обработки модификатором трения. Изучение этих микрофотографий показывает, что поверхности образцов №1 и №2 имеют однородную структуру, с чередующимися неглубокими впадин и микровыступами, представляющими собой след резца после механической обработки ролика. Электронное изображение поверхностей образцов №1 и №2 представлены на рисунке 3.



а) *б)*

Рис. 3. Электронное изображение поверхностей: *а)* образец №1, *б)* образец №2

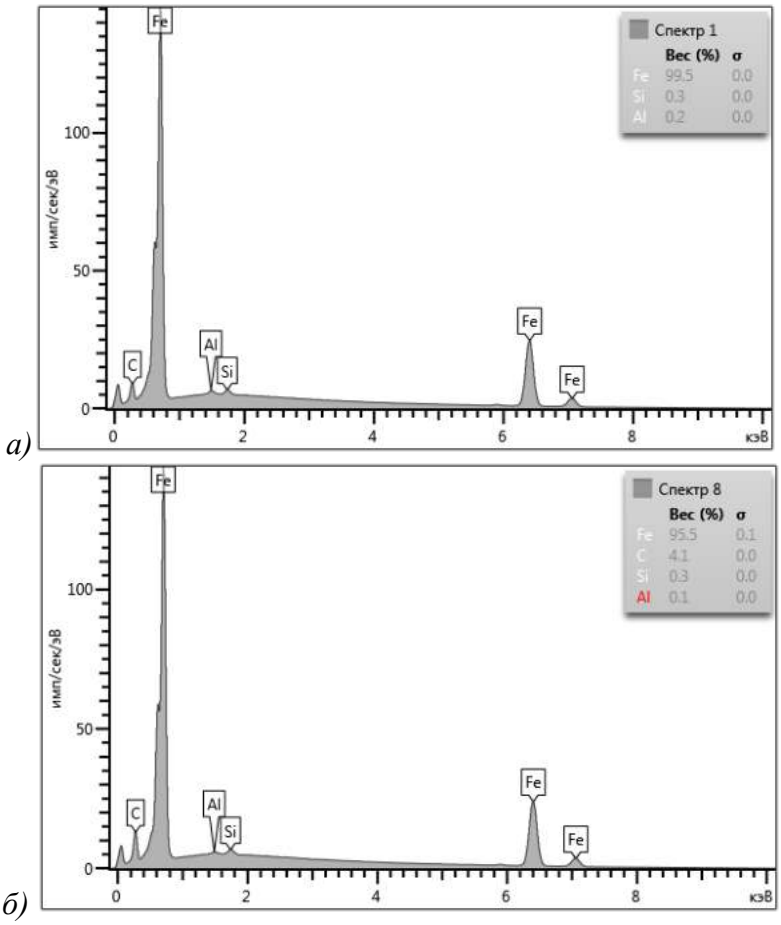
Спектры продемонстрировали состав полученной поверхности с точностью определения 0,1% мас. На спектрах видны пики, соответствующие характеристическим линиям элементов. Проведенный в различных точках покрытий рентгеноспектральный микроанализ поверхности образцов №1 и №2 подтвердил наличие элементов из состава материала – сталь.

Иллюстрация среднего элементного состава спектров анализа поверхности образцов №1 и №2 представлены на рисунке 4.

Анализ представленных данных позволяет сделать заключение, о том, что на поверхности образцов содержатся преимущественно железо, углерод и кремний, что характерно для стали. Скачки спектра на рисунке объясняются наличием загрязнения на поверхности образца №2, оно же представлено в правой части электронного изображения поверхности рисунка 3б.

Поверхности верхнего №7 и нижнего №8 образцов являются поверхностями с обработкой модификатором трения в присутствии масляного загрязнителя. Вид поверхности фрикционной дорожки образцов представлен на рисунке 5.

Изучение этих микрофотографий показывает, что на поверхности образцов имеются образованные вторичные структуры, представляющие собой равномерное покрытие, с чередующимися микровыступами с ярко выраженными пиками (чешуйками) образованных вторичных структур.

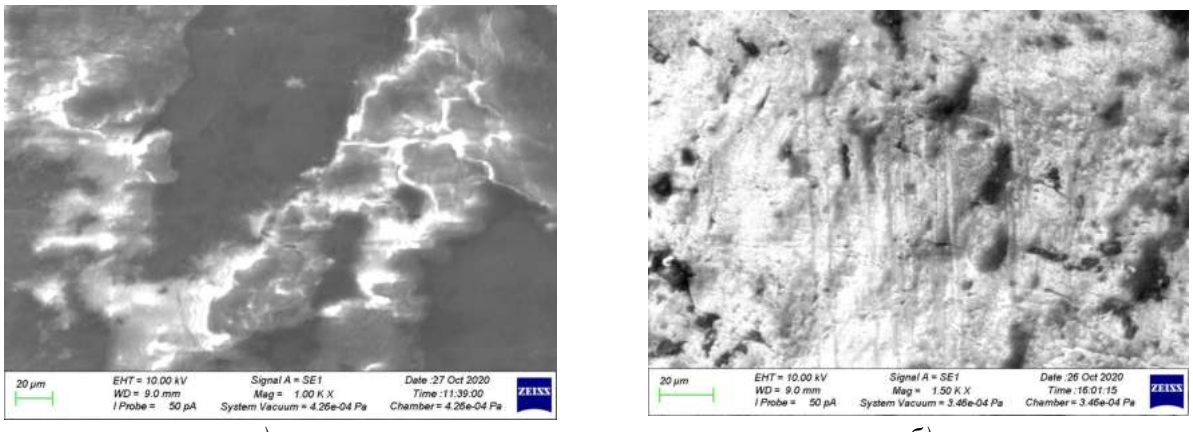


а)

б)

Рис. 4. Обзорные спектры элементного состава поверхности:
а) образец №1, *б)* №2

Детальное исследование слоев проведено с применением методов рентгеноспектрального микроанализа и получения изображений отдельных участков исследуемого образца в лучах рентгеновских линий элементов, представляющих интерес.



а) *б)*

Рис. 5. Электронное изображение поверхностей:
а) образец №7, *б)* образец№8

Проведенный в различных точках покрытий рентгеноспектральный микроанализ поверхности образцов №7 и №8 подтвердил наличие в составе образующихся покрытий элементов из состава материала образцов №1 и №2 соответственно, а также материала модификатора трения, а именно алюминия, а также наличие линии кислорода, свидетельствующее о присутствии окислов указанных металлов на поверхности образца.

Иллюстрация среднего элементного состава спектров анализа поверхности образцов №7 и №8 представлены на рисунке 7. Наличие спектра, кремния и других элементов, с содержанием менее 1 %, наблюдается в связи с подачей в контактную зону масляного загрязнителя.

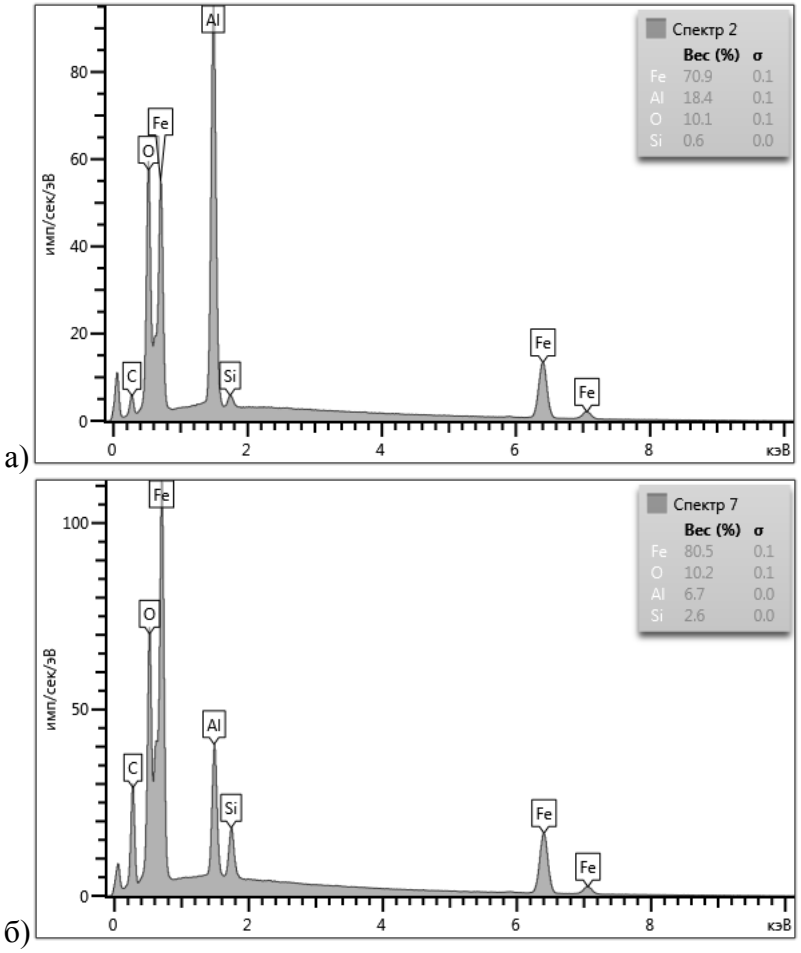


Рис. 7. Обзорные спектры элементного состава поверхности:
а) образец №7, *б)* образец №8

Анализ представленных данных позволяет сделать заключение, о том, что вторичные структуры, образовавшиеся на поверхности образцов №7 и №8, содержат преимущественно оксид железа и оксид алюминия. Анализ спектров различных участков образцов показывает, что алюминий присутствует на поверхности в большой степени. Средний удельный вес основных элементов, в %, составляет:

- у образца №7 - Fe (32,9 %), O (36,0 %), Al (30,7 %) и Si (0,4);
- у образца №8 - Fe (87,6 %), O (6,8 %), и Al (6,1 %).

При этом следует отметить определенную однородность поверхности с ярко выраженными образованными островками вторичных структур. Наличие *Al* во вторичных структурах на поверхности образцов №7 и №8 свидетельствует о его переносе на верхний ролик и переносе материала модификатора с верхнего образца на нижний, при этом наблюдается уменьшением шероховатости поверхности и как следствием вытеснением загрязнителя из зоны трения. Это подтверждает предположение о защите поверхности контртела от износа за счет гарантированного переноса материала модификатора трения из зоны трибоконтакта на поверхность контртела даже при наличии масляного загрязнителя.

Суммарные спектры элементного состава образцов №7 и №8 представлены на рисунке 8. Анализ представленных данных позволяет сделать заключение о том, что на поверхности образцов содержатся в составе образующихся покрытий элементы из состава материала образцов №1 и №2 соответственно, а также материала модификатора трения, а именно *Fe, Al, Si*, а также наличие линии кислорода, свидетельствующее о присутствии окислов указанных металлов на поверхности образца.

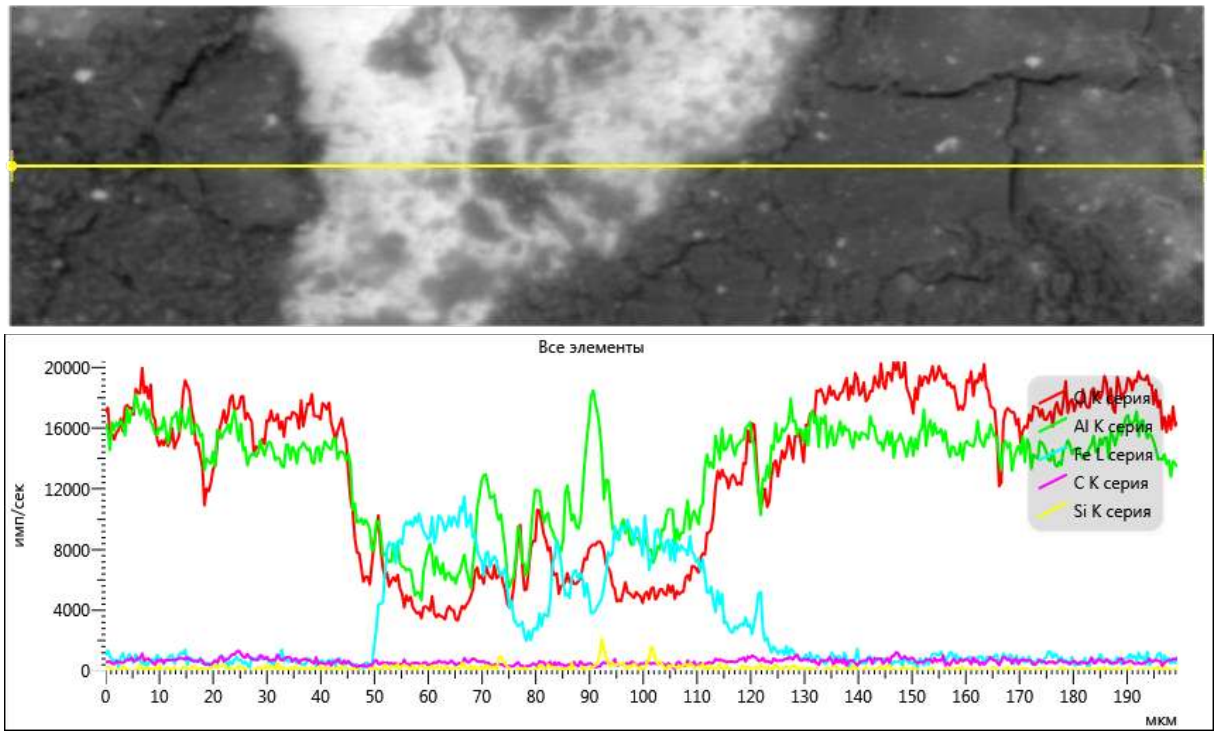


Рис. 8. Суммарные спектры элементного состава поверхности:
а) образец №7, *б)* образец №8

Наличие спектров кремния и отсутствие спектра кислорода на ряде графиков свидетельствует о наличие масляного загрязнителя на поверхности образца и, следовательно, о защите базовой поверхности от взаимодействия с кислородом из воздуха среды, окружающей открытый узел трения.

Подача твердого алюминия при аналогичных условиях не значительно повлияла на изменение коэффициента трения после нанесения загрязнителя.

Выводы

Эффективная работа модификатора трения в виде мягкого алюминия обусловлена лучшим нанесение на поверхность за счет своих физико-механических свойств, уменьшением шероховатости поверхности, что способствуют вытеснению загрязнителя с поверхности образцов за счет уменьшения невыдавливаемых объемов и увеличению коэффициента трения за счет увеличения фактической площади касания в трибоконтакте. Наличие достаточного объема материала модификатора на поверхности верхнего образца объясняется наличием прочной химической связи между компонентами поверхности образца и материала модификатора трения. Наличие алюминия во вторичных структурах на поверхности образцов свидетельствует о его переносе с верхнего ролика в зону трения даже в условиях наличия масляного загрязнения поверхностей трения, что согласуется с ранее проведенными исследованиями.

Библиографический список

1. **Bulavin, Y.P.** Models of Locomotive Traction Drives for the Improvement of Sand Feeding System / Y.P. Bulavin, I.V. Volkov, P.Y. Konovalov / (2021) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 666 (4), статья № 042089. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042089

2. **Dumitriu, M.** Modeling of railway vehicles for virtual homologation from dynamic behavior perspective. Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 371. P. 647-651.

3. **Wolter, K.U.** Correlation between track geometry quality and vehicle reactions in the virtual rolling stock homologation process. In: 9th World Congress on Railway Research / K.U. Wolter, M. Zacher, B. Slovak // May 22-26, 2011.

4. **Харламов, П.В.** Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе "железнодорожный путь - подвижной состав**"** / П.В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. №. 1, С. 122-129. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_122

5. Metal plating of friction surfaces of the “wheel–rail” pair / V.V. Shapovalov [et al.] / - Journal of Friction and Wear. 2020. Т. 41. № 4. С. 338-346.

6. **Патент РФ № RU 2740465 C1.** Способ термоплакирования стальных поверхностей трения / В.В. Шаповалов [и др.]; B61K 3/02, № заявки 2019145543, заявл. 30.12.2019; опубл. 14.01.2021.

7. **Патент РФ № RU 2750585 C1** Способ модифицирования систем термоплакирования стальных поверхностей трения / В.В. Шаповалов [и др.]; B61K 3/02, № заявки 2020134704, заявл. 21.10.2020; опубл. 29.06.2021.

8. NewView 600. Microscope Application Manual. – URL: https://engineering.tufts.edu/ microfab/documents/Zygo.pdf (дата обращения 15.08.2021).

Программа и методики исследования свойств модифицированного покрытия поверхности трибоконтакта ПП.0203.001-ПМ, ФГБОУ ВО РГУПС, утв. 24.12.2018г., 20 стр.

УДК 620.168, 623.562.3 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_300

В.Я. Шевченко, академик РАН **(**Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН**), М.В. Сильников,** член-корреспондент РАН, **И.В. Гук,** канд. техн. наук, **А.И. Михайлин,** д-р техн. наук, **(**АО НПО Спецматериалов**), С.Н. Перевислов,** д-р техн. наук **(**Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН**), Н.М. Сильников,** канд. техн. наук, **(**АО НПО Спецматериалов**)**

МЕХАНИКА КОМПОЗИТА АЛМАЗ-КАРБИД КРЕМНИЯ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. *Сформулированы научные основы синтеза нового класса материалов с регулируемой (периодической) взаимосвязанной структурой на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии. Проведен анализ химического синтеза на основе реакционно-диффузионной реакции Тьюринга, позволяющий получить периодические микроструктуры и создан новый тип композитной карбидокремниевой керамики с микроструктурой алмаз–β-SiC, в которой однородно распределенные кристаллы алмаза имеют правильную форму. По сравнению со стандартными реакционно-спеченными карбидом кремния и карбидом бора материал показал наивысшие механические характеристики: при плотности 3,4 г/см^3 модуль Юнга достигает 720 ГПа, а твердость по Викерсу - 63 ГПа. На основе созданной керамики, получившей название «Идеал», и пластин из спеченного сверхвысокомолекулярного полиэтилена высокой плотности были созданы облегченные композитные защитные конструкции, которые затем подвергнулись обстрелу из автомата АК-103 калибра 7,62 мм пулями ПС со стальным термоупрочнённым сердечником, патрона инд. 57-Н-231, а также автомата АК-47 с патронами инд. 7Н10, пулей ПП со стальным*

термоупрочненным сердечником. Все образцы успешно выдержали испытание.

The authors consider a new type of ceramics with a unique structure and evaluate its applicability to the body armor issues. The authors consider a new type of ceramics with a unique structure and evaluate its applicability to the body armor issues. The initial components of the ceramic are silicon powder and a mixture of diamond powders with a size of particles that subsequently provide the formation of a hierarchical structure. In the resulting microstructure -diamond – β-SiC, the diamond crystals have a regular shape and are uniformly distributed in the composite. Compared with a standard reaction-sintered silicon carbide and a boron carbide, the material showed the highest mechanical characteristics: at a density of 3.4 g/cm3, Young's modulus reaches 720 GPa, and Vickers hardness is 63 GPa. The protective structure, consisting of ceramic tiles ("Ideal") and a plate of ultra-high-modulus polyethylene with a surface density of 20.9 kg/m2 was tested. For the testing AK-103 assault rifle with 7.62 x 39 mm hardened steel-core bullets, cartridge ind. 57-N-231, and the AK-47 assault rifle with 5.45 x 39 mm hardened steel-core bullets, cartridge ind. 7N10, were used. All samples passed the test.

Ключевые слова: трижды периодические поверхности минимальной энергии, реакция Тьюринга, гетерогенетические пары неорганических веществ, система алмаз(углерод)–кремний, карбиды, баллистические испытания, органокерамическая панель, пулестойкость.
Keywords: triple-periodic surfaces of minimum energy, Turing reaction, heterogeneous pairs of inorganic substances, diamond(carbon)-silicon system, carbides, ballistic tests, organoceramic panel, bullet resistance.

Введение

При анализе физических свойств того или иного материала естественным стремлением является получение регулярной (периодической) объемной взаимосвязанной микроструктуры, однородной по составу и свойствам. Первым шагом на пути решения этой задачи является использование топологии в структурной химии веществ, что дает возможность синтеза новых материалов и композитов на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ). В 1952 г. А. Тьюринг показал математически, что двухкомпонентная реакционно- диффузионная система с диффузией компонентов и нелинейными условиями реакции показывает спонтанное формирование пространственно периодических структур, если удовлетворяются определенные условия. Для создания трехмерных взаимосвязанных структур Тьюринга возможно осуществить синтез двухкомпонентных систем алмаз–карбид кремния.

Совершенствование средств индивидуальной бронезащиты идет одновременно по нескольким направлениям [1,2], и одним из важнейших направлений является именно создание новой высокопрочной керамики. Технологический процесс изготовления нового типа композитной керамики основан на методе “Скелетон”, заключающийся в создании каркасов из компонентов композита, и их последующем взаимодействии. Предварительно подготовленный каркас (скелет) из порошков алмаза помещали в реактор, где и проходил синтез алмаз (углерод) и порошка кремния. Все операции были типичными для керамической технологии [3]. Важно было подобрать концентрации компонентов, их дисперсность, соотношение синтетических и природных (частично ограненных) алмазных порошков. Необходимо, чтобы структурные особенности соответствовали геометрии трижды периодических поверхностей минимальной энергии.

В материале «Идеал» карбид кремния синтезируется в результате реакционно-диффузионного взаимодействия кремния с графитом, образовавшемся на поверхности

алмазных частиц при их поверхностной графитизации [4]. Важным условием при спекании является наличие хорошо ограненных частиц алмаза, что приводит к образованию когерентных границ растущих кристаллов карбида кремния на частицах алмаза. В качестве исходных компонентов композиционного материала алмаз-карбид кремния используют смесь алмазных порошков разного фракционного состава, для обеспечения плотной упаковки частиц заготовки при формовании.

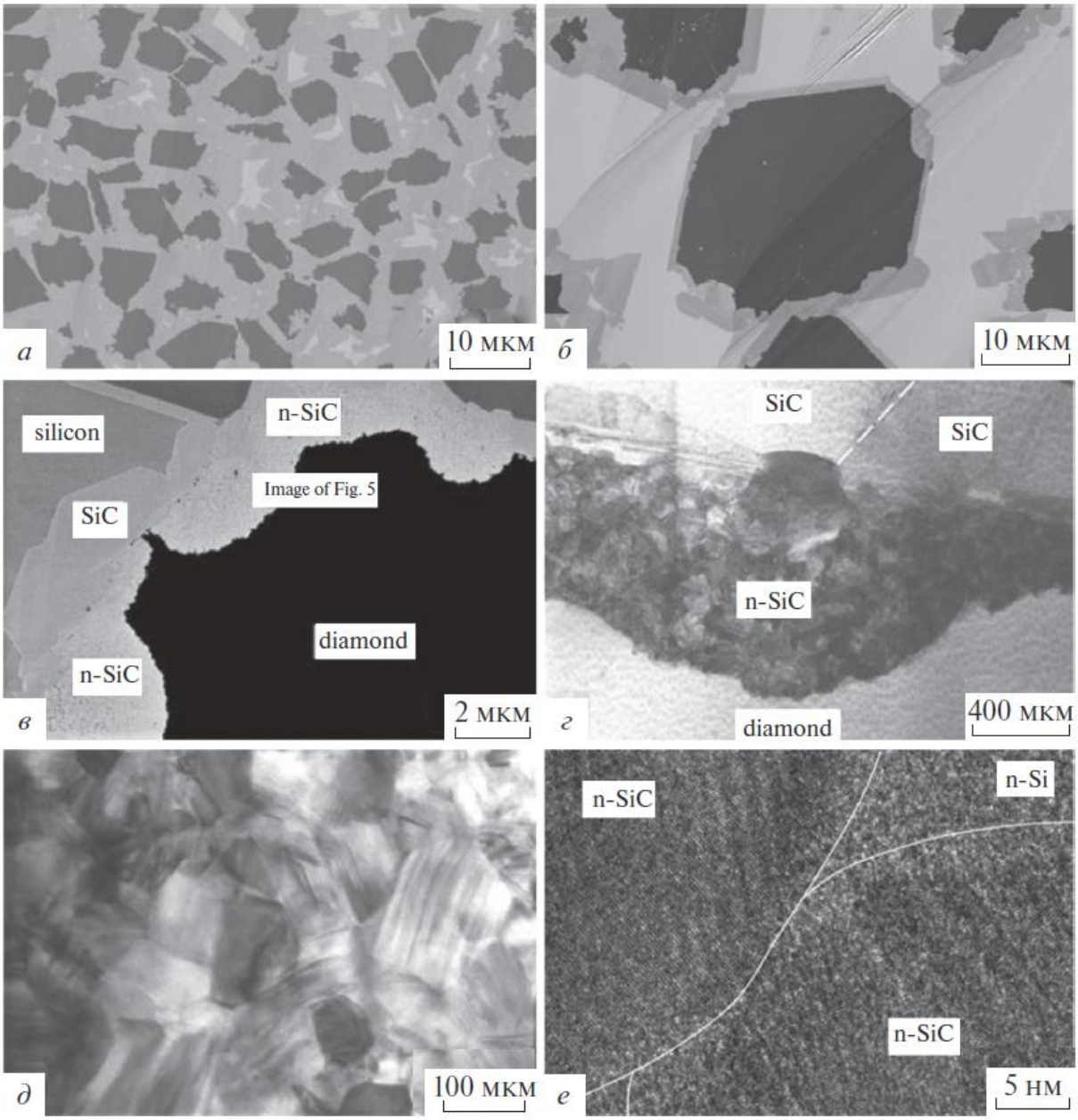


Рис. 1. Характерные фотографии микроструктуры композита «Идеал» в различных масштабах съемки

Регулирование концентрации компонентов, температуры процесса пропитки, давления среды и т.д. позволяет реализовать реакционно-диффузионный механизм Тьюринга (синтеза и роста «забора» Тьюринга – кристаллов карбида кремния на частицах алмаза [5,6]) и получить материал с регулярной (периодической) микроструктурой. Материал «Идеал», по сравнению со стандартными реакционно-спеченными материалами на основе карбида кремния и карбида бора [7], характеризуется наивысшими механическими характеристиками (выше только у монокристаллического алмаза) (табл. 1).

Однако на практике, в бронезащите, керамика используется в составе композитных блоков, включающих, помимо керамического слоя, металлическую или полимерную подложку, а также тканевый защитный пакет. Поэтому оценка защитных свойств керамики была проведена в составе композитной структуры.

Таблица 1

Механические свойства материалов на основе SiC, B_4C и алмаза

Материал	Плотность ρ, г/см^3	Модуль упругости *E*, ГПа	Прочность при изгибе, МПа	Скорость звука, м/с	Коэффициент трещиностойкости, МПа·м$^{1/2}$	Твердость по Виккерсу, ГПа
SiSiC	3,10	329	400	10200	3,5	21
LPSSiC	3,25	358	520	10800	5,5	21
HPB_4C	2,75	431	450	13000	3,8	32
Композит «Идеал»	3,35	754	420	15000	4,5	65

SiSiC – реакционно-спеченный карбид кремния; LPSSiC – жидкофазно-спеченный карбид кремния; HPB_4C – горячепрессованный карбид бора

Методика эксперимента и результаты баллистических испытаний

Существует насколько методик оценки баллистических характеристик собственно керамики [8].

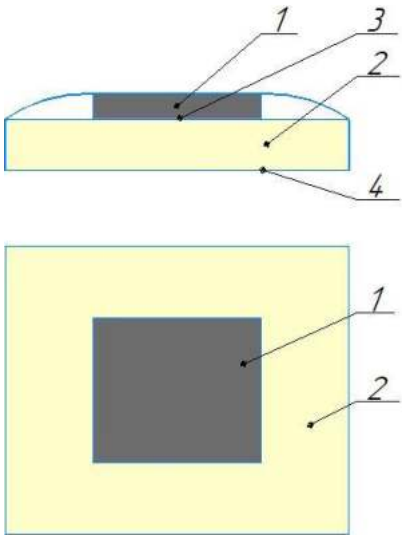


Рис. 2. Образец для баллистических испытаний: *1* – керамическая плитка; *2* – подложка из сверхвысокомолекулярного полиэтилена; *3* – монтажная пленка, склеивающая керамику и подложку; *4* – обмотка образца арамидной тканью

Испытания проводили на модельных образцах композитных органокерамических структур. Образец представлял собой отдельную керамическую плитку размером 65×65 мм и толщиной 5,5 мм, закрепленную с помощью монтажной этиленвинилацетатной пленки толщиной 300 мкм на прессованную пластину из сверхвысокомолекулярного полиэтилена высокой плотности, размером 800×800 мм и толщиной 11 мм. Образцы композитных структур были обмотаны двумя слоями арамидной ткани Twaron CT 716.

Оценим характеристики керамики «Идеал» с точки зрения практического применения в средствах индивидуальной защиты. Поверхностная плотность исследованной в настоящей работе защитной структуры: керамика - 8,53 кг/м^2; подложка из сверхвысокомолекулярного полиэтилена - 10,67 кг/м^2; защитный арамидный пакет – 1,12 кг/м^2; монтажная пленка – 0, 60 кг/м^2. В целом поверхностная плотность защитной структуры составляет 20,9 кг/м^2, что

позволяет получить защитную панель класса Бр4 по ГОСТ Р 50744-95, стандартной площадью 7,5 дм^2 и массой менее 1,6 кг.

а) *б)*

Рис. 3. Образец после выстрела из автомата АК-103 калибра 7,62 мм пулей ПС со стальным термоупрочнённым сердечником, патрона инд. 57-Н-231 со скоростью 706 м/с: а) внешний вид; б) вид разрушенной керамической плитки на подложке после снятия внешнего арамидного пакета

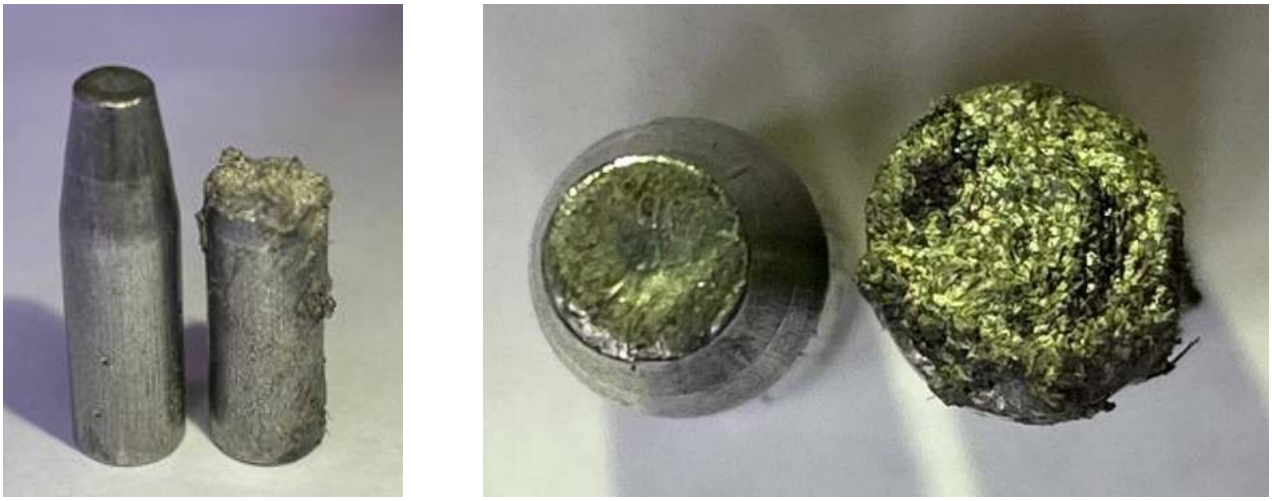


Рис. 4 – Вид термоупрочненного сердечника пули калибра 7,62:
слева – исходный, справа – после выстрела по защитной структуре

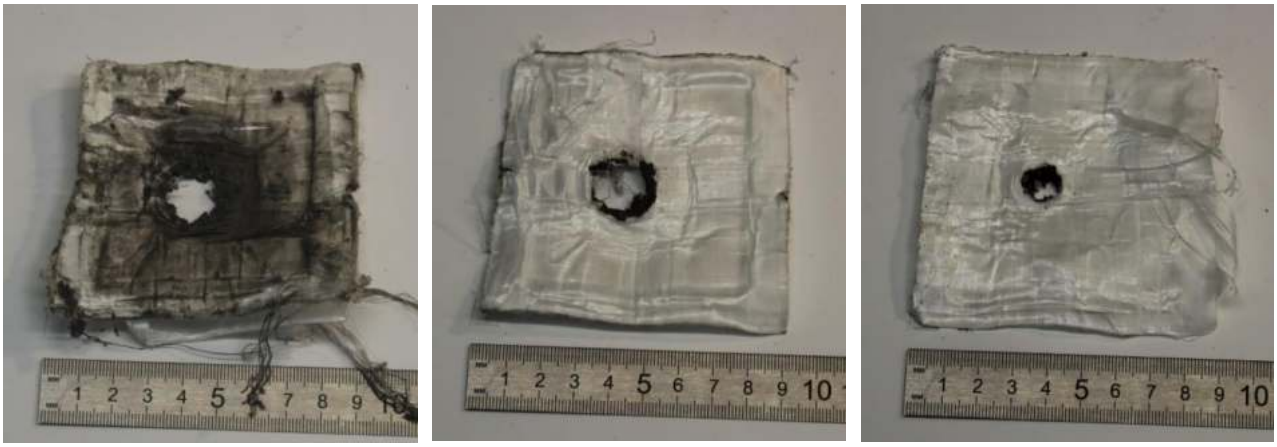


Рис. 5 – Слои подложки после выстрела. Слева направо: 1й, 25й и 49й

Рис. 6 – Образец после выстрела из автомата АК-74 с патронами инд. 7Н10, пулей ПП со стальным термоупрочненным сердечником (скорость 906 м/с). Показаны лицевая и тыльные стороны образца

Заключение

Представленная работа рассматривает новый тип композиционной керамики на основе алмазных частиц с уникальной трижды периодической микроструктурой и проводит экспериментальную оценку возможности использования ее для изготовления элементов бронезащиты. Композиционный материал алмаз-карбид кремния («Идеал») получен пропиткой жидким кремнием пористой заготовки из алмазных частиц. Регулирование концентрации компонентов, температуры процесса пропитки, давления среды и т.д. позволяет реализовать реакционно-диффузионный механизм Тьюринга (синтеза и роста «забора» Тьюринга – кристаллов карбида кремния на частицах алмаза) и получить материал с регулярной (периодической) микроструктурой. Материал «Идеал», по сравнению со стандартными реакционно-спеченными материалами на основе SiC и B4C, характеризуется наивысшими механическими характеристиками (выше только у монокристаллического алмаза).

Библиографический список

1. **Сильников, М.В.** Нанотехнологии в средствах индивидуальной и коллективной защиты / М.В. Сильников, В.И. Гуменюк, В.Н. Тарабанов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 3-4(81-82). С.11-16.

2. **Сильников, М.В.** Разработка пулестойкого материала из баллистической ткани за счет многоступенчатой обработки химическими составами / М.В. Сильников, Н.М. Сильников, А.И. Спивак, Д.Д. Барков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2020. № 3-4 (141-142). С. 135-139.

3. **Шевченко, В.Я.** Введение в техническую керамику. / В.Я. Шевченко // М.: Наука. 1993. 114 с.

4. **Khmelnitsky, R.A., Gippius, A.A.** Transformation of diamond to graphite under heat treatment at low pressure / R.A. Khmelnitsky, A.A. Gippius // Phase Transitions. 2014. V. 87. № 2. P. 175-192.

5. **Turing, A.** The chemical basis of morphogenesis / A. Turing // Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B. 1952. V. 237. № 641. P. 37-72.

6. New chemical technologies based on Turing reaction–diffusion processes / V.Y. Shevchenko [et Al.] // Doklady Chemistry. – Pleiades Publishing. 2021. V. 496. № 2. P. 28-31.

7. **Зайцев, Г.П.** Корундовая бронекерамика: опыт производства и применения / Г.П. Зайцев // ЭКСПЕРТНЫЙ СОЮЗ. № 03. 2019.

8. **Grouch, I.G.** Ed. The science of armour materials. / I.G. Grouch // Woodhead Publishing, 2016, P. 754

СЕКЦИЯ 5.
Новые износостойкие материалы и упрочняющие технологии

УДК 621.794.61:669.056.93 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_306

А.Д. Быкова, Е.Б. Седакова, д-р техн. наук (Институт проблем машиноведения Российской Академии наук)

МОДИФИЦИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ДВУХСЛОЙНЫМ ИЗНОСОСТОЙКИМ Al-Al_2O_3 ПОКРЫТИЕМ

Аннотация. *Комплексом методов микродугового оксидирования и "холодного" газодинамического напыления синтезированы износостойкие керамические композиционные покрытия на металлической подложке. Экспериментально показана возможность заполнения твердосмазочным материалом и маслами пористой структуры оксидных покрытий, формируемых микродуговым оксидированием. Получены антифрикционные металлокерамические покрытия на стальных материалах, перспективные для работы в контактных узлах трения машинных систем.*

By a complex of microarc oxidation and "cold" gas-dynamic spraying methods the wearproof ceramic composite coatings on metal substrate have been synthesized. The possibility of filling the porous structure of oxide coatings formed by micro-arc oxidation with solid-lubricant and oils has been experimentally shown. Antifriction metal-ceramic coatings on steel materials, promising for work in contact knots of friction of machine systems are obtained.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, холодное газодинамическое напыление, никелирование, антифрикционное покрытие.
Keywords: microarc oxidation, cold gas dynamic spraying, nickel plating, antifriction coating.

Известно, что изнашивание рабочих поверхностей узлов трения приводит к нарушению эксплуатационных свойств машин и механизмов, а также является одной из главных причин наступления критического состояния узлов трения. В настоящее время для продления срока службы трибосопряжений наряду с разработкой новых материалов широко используют различные способы модификации поверхностей, например, применяют механическое упрочнение, химико-термическую обработку, закалку лазерным воздействием и токами высокой частоты, используются различные методы нанесения покрытий [1]. В результате формируется поверхностный слой со структурой, свойствами и химическим составом значительно отличающийся от основного материала детали.

В машиностроении наиболее распространенными конструкционными материалами являются стали различных марок из-за сочетания таких свойств, как высокая вязкость и прочность на разрыв, хорошая способность к механической обработке и низкая стоимость [2]. При этом одной из главных причин уменьшения срока службы стальных деталей является коррозионно-механическое разрушение. Например, в нефтегазовой отрасли детали запорной арматуры работают в условиях сочетания двух негативных факторов: повышенной минерализации технологических сред и наличия сероводорода, который приводит к сульфидному растрескиванию. Абразивные частицы, попадающие в зону трения, дополнительно могут интенсифицировать водородное охрупчивание и сульфидное растрескивание. Эти факторы обуславливают повышенные требования к износостойкости рабочих поверхностей оборудования.

Перспективным решением этой проблемы является создание двухслойного покрытия с нижним слоем, защищающим от коррозии и наводораживания, и верхним слоем,

защищающим от износа. В качестве основы для синтеза защитного слоя от коррозионно-механического разрушения можно выбрать алюминий. Основным компонентом верхнего слоя двухслойного покрытия рационально выбрать Al_2O_3, так как он химически инертен, имеет большой показатель твердости и обладает устойчивостью к истиранию. При заполнении пор верхнего слоя антифрикционными металлами или маслами такое покрытие может работать в трибосопряжениях без дополнительной смазки.

Такую композицию можно получить, комбинируя нанесение слоя алюминия с последующим использованием методов обработки поверхности, позволяющих превратить поверхность покрытия в оксид. В данной работе для нанесения слоя Al на стальную подложку был выбран метод «холодного» газодинамическое напыления (ХГДН). На втором этапе формирования комбинированного покрытия для превращения Al в Al_2O_3 был использован метод микродугового оксидирования (МДО). Оксидный слой, образованный методом МДО, обладает наибольшими твердостью, износостойкостью и высокой адгезией к подложке за счет химического соединения с ней [3].

Цель работы – модифицирование рабочих поверхностей деталей узлов трения двухслойным износостойким Al-Al_2O_3 покрытием, получаемым за счет комплексного использования методов холодного газодинамического напыления и микродугового оксидирования, а также исследование его трибологических характеристик.

Для получения покрытий в качестве основы использовали образцы размером 50х20х3 мм, изготовленные из алюминиевого сплава АК7ч и АО3-7.

Для проведения «холодного» газодинамического напыления (ХГДН) был использован алюминиевый порошок марки А-80-13 с добавлением 40 % масс. порошка корунда (технологическая добавка) марки 25А зернистостью F360.

Порошок измельчали и просеивали с целью выделения необходимой для напыления фракции 10-60 мкм.

Холодное газодинамическое напыление, при котором формируется прочный металлический слой при взаимодействии двухфазного сверхзвукового потока с поверхностью[4], осуществляли на установке «Димет-403». После нанесения покрытия ХГДН и соответствующей механической обработки, проводили микродуговое оксидирование (МДО). При пропускании тока большой плотности через границу раздела металл-электролит создаются условия, когда на поверхности металла возникают микроплазменные разряды с высокими локальными температурами. Результатом действия разрядов в условиях интенсивного теплоотвода в электролит является формирование тонкослойного оксидно-керамического покрытия [3]. МДО осуществляли на установке ИПТ-1000.

В качестве рабочего раствора при МДО использовали электролит силикатно-щелочной, состав: гидроксид калия – 2 г/л; жидкое стекло – 8 г/л, остальное – вода. Продолжительность МДО составляла 1,5 час в анодно-катодном режиме при плотности переменного тока 13-15 А/дм2.

Никелирование после МДО проводили в специально разработанном электролите, содержащем [5]: никель сернокислый 35,0—55,0 г/л; ацетат натрия 25,0—30,0 г/л; уксусную кислоту 4,5—5,0 мл/л; натрия ларилсульфат 0,1—1 г/л; pH 3,5. Плотность тока 0,1—1,0 А/дм^2. Продолжительность никелирования составила 1 ч.

Дисперсность порошковых материалов измерялась методом лазерного дифракционного анализа с помощью прибора Malvern Mastersizer 2000.

Фазовый состав покрытий изучали на рентгеновском дифрактометре «D8 Advance» фирмы Bruker (Германия).

Для оценки износостойкости покрытий использовали машину трения «МТУ-1» по схеме «вращающиеся пальчики из стали 18ХГТ – неподвижный диск с покрытием». Площадь контакта составляла 1,5 см^2, продолжительность испытаний – 20 часов, нагрузка – 1,5 МПа при частоте вращения 580 мин$^{-1}$.

Маслоемкость МДО-покрытий определяли по ГОСТ 9.302-88.

Результаты исследований

На поверхности стальных образцов порошковым материалом А-80-13 были сформированы алюминиевые покрытия толщиной h = 200 мкм. Упрочнение поверхности микродуговым оксидированием в силикатно-щелочном электролите привело к формированию внешнего композиционного керамического слоя, при этом толщина переходного алюминиевого слоя к основе составила h ≈ 70 мкм. Фазовый состав оксидно-керамического слоя представлен основной тугоплавкой и термически стойкой фазой муллита сложного стехиометрического состава, обладающего некоторой пластичностью, по сравнению с оксидом алюминия, а так же незначительным содержанием α-, η-Al_2O_3 и аморфной фазы SiO_2, что объясняет наличие на поверхности образцов технологического слоя [6].

На рис. 1 показаны результаты износа покрытий и образцов-свидетелей в ходе трибологических испытаний. В табл.1 приведены данные по скорости изнашивания сравниваемых пар трения.

Установлено, что износостойкость упрочненных МДО алюминиевых покрытий, сформированных «холодным» газодинамическим напылением, примерно в 3,1…3,3 раза выше износостойкости не упрочненных покрытий и в 2,2…2,5 раза выше износостойкости алюминиевого сплава АК7ч, принятого за эталон сравнения. При этом следует отметить, что износостойкость упрочненных МДО алюминиевых покрытий несколько ниже износостойкости оксидно-керамических покрытий, полученных на алюминиевых сплавах.

Таблица 1

Оценка скорости изнашивания пар трения

Испытываемый материал	Скорость изнашивания пары трения (х0,01), г/ч
Сплав АК7ч	2,97
Сплав АК7ч, упрочненный методом МДО	1,19
Покрытие ХГДН	4,03
Покрытие ХГДН, упрочненное методом МДО	1,41

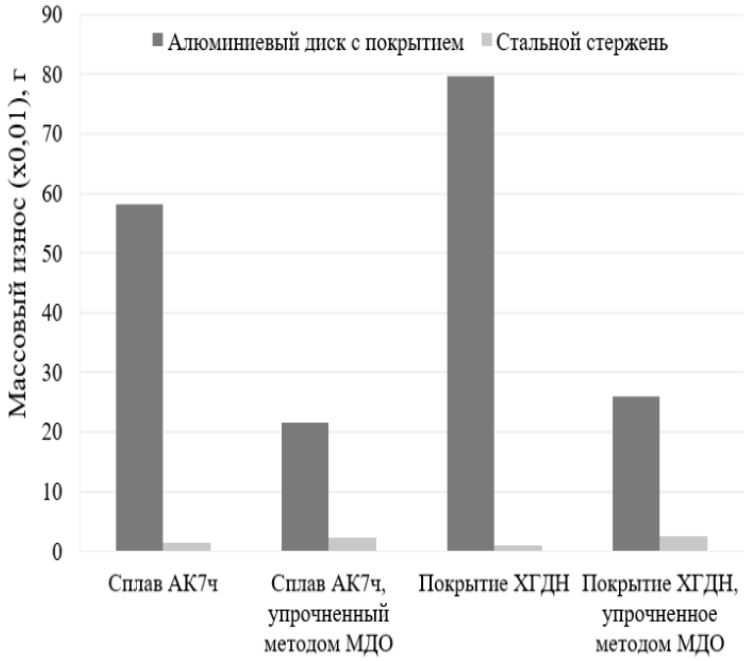


Рис. 1. Результаты испытаний пар трения «диск - пальчики»

Метод МДО позволяет получить очень твердые керамические покрытия с высокой адгезией, а также с особой морфологией, которая изменяется от плотной области около границы раздела с металлом основы до пористой внешней области. Такие свойства означают, что МДО-покрытия могут быть идеальным подслоем для нанесения на них твердых смазочных материалов, которые могут захватываться внешними порами и обеспечивать резервуары для трибологической контактной смазки.

Поскольку существенный интерес для изучения триботехнических свойств МДО-покрытий представляет изучение влияния на трибологические характеристики наличия твердосмазочноых материалов, была проведена апробация нанесения на МДО-покрытие поверхностного слоя никеля. Никелевое покрытие формировали методом электрохимического осаждения металла на поверхность и в поры МДО-покрытия [5]. Никель, являющийся твердосмазочным материалом и присутствующий в зоне фрикционного контакта, улучшает прирабатываемость поверхностей в паре трения, а также в условиях «сухого» трения способен снижать коэффициент трения [7, 8].

Трибологические параметры пар трения с МДО-покрытием определялись в следующем порядке. Сначала образцы прирабатывали до образования видимой контактной дорожки на плоской поверхности диска под нагрузкой 0,17 МПа со скоростью скольжения 6,75 м/с. Регистрировалось текущее значение момента трения, длина пути трения и время, которое требуется для появления дорожки износа. Затем были изучены зависимости коэффициента трения и износа от значения контактного давления. Данные характеристики определялись на скорости скольжения 6,75 м/с с помощью постепенного увеличения нагрузки до предельного значения (критической точки), при которой наблюдалось резкое увеличение момента трения и износа (зона пластической деформации).

График зависимости коэффициента трения от удельной нагрузки представлен на рисунке 2.

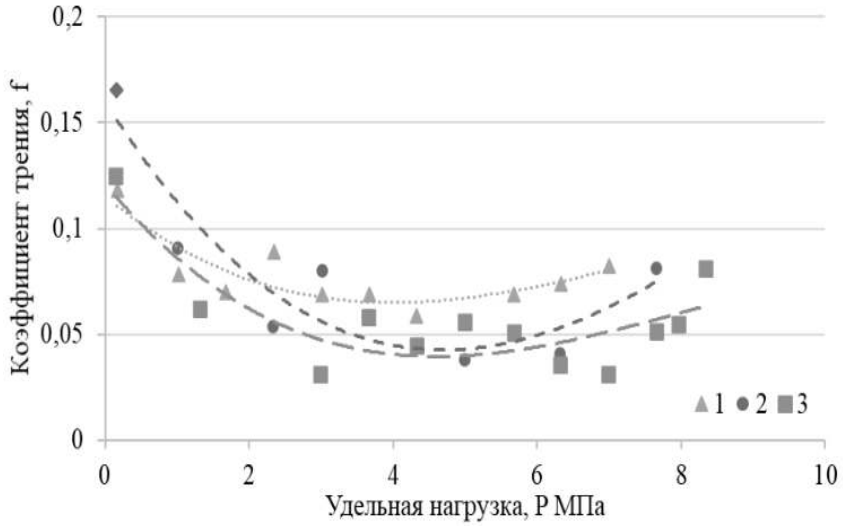


Рис. 2. График зависимости коэффициента трения от удельной нагрузки. Трение образцов из стали 18ХГТ по следующим материалам: ▲ - пара трения № 1 (алюминиевый сплав); ● - № 2 (алюминиевый сплав с МДО - покрытием); ■ - № 3 (алюминиевый сплав АО3-7 с МДО-покрытием, модифицированным антифрикционным слоем)

По результатам испытаний видно, что при трении образца без МДО-покрытия о сталь 18ХГТ в установившемся режиме трения коэффициент трения составляет 0,06…0.07. Хотя максимальное значение нагрузки для данной пары трения составляло 7 МПа, даже при нагрузке p = 3,7 МПа можно было наблюдать резкие скачки силы трения и нестабильность процесса трения. На значении нагрузки p=4,3 МПа происходит мгновенное схватывание образцов, но следов задиров на трущихся поверхностях не обнаружено. При увеличении

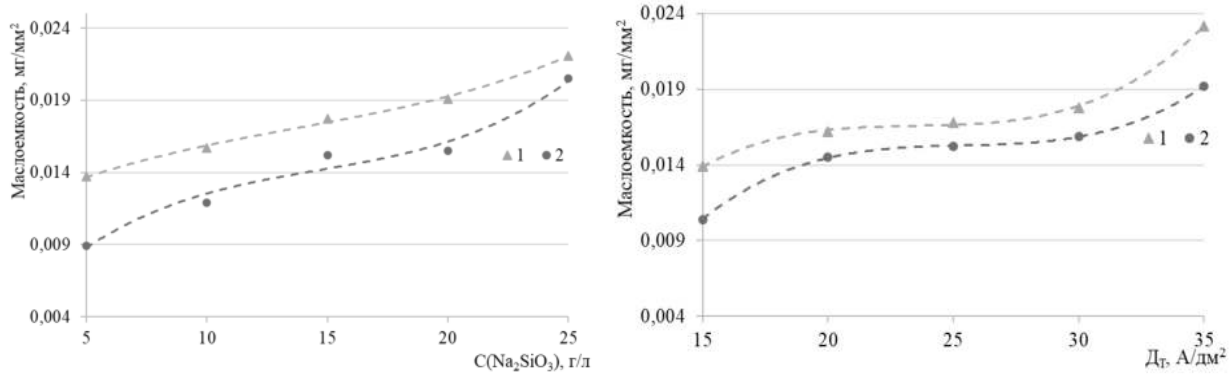
нагрузки до 7 МПа происходит резкое увеличение силы трения в зоне контакта, что приводит к схватыванию и истиранию поверхностей.

Микродуговое оксидирование поверхности образца позволяет понизить коэффициент трения в паре трения № 2 (со сталью 18ХГТ) на 40 ... 45% (до 0,04 ... 0,05), а также нагрузочная способность пары трения увеличивается до 7,7 МПа. Процесс трения стабилен до нагрузки р = 6,3 МПа (в отличие от пары трения № 1), после этого значения начинаются колебания и скачки силы трения. При повышении нагрузки до р = 7,7 МПа поверхности начинают схватываться.

Нанесение тонких слоев антифрикционных материалов на поверхность МДО-покрытия (пара трения № 3) позволяет увеличить нагрузочную способность на 15...20% в сравнении с парой трения № 1 (до 8,3 МПа) с коэффициентом трения в данной паре трения 0,03...0,05. Также, как и в паре трения № 2, процесс трения стабилен на всем диапазоне приложенной нагрузки. При максимальной нагрузке р - 8,3 МПа через две минуты испытаний сила трения увеличивается, в результате чего поверхность образцов начинает схватываться.

Существенный интерес представляет изучение такого свойства покрытий, как маслоемкость, поскольку количество масла, которое способно адсорбировать МДО-покрытие при трении в присутствии смазки, оказывает существенное влияние на его изнашивание. Поскольку сущность процесса микродугового оксидирования подразумевает присутствие некоторой сквозной и замкнутой пористости в синтезируемом покрытии, то маслоемкость МДО-покрытий будет зависеть от значений этих параметров. Также очевидно, что присутствие определенного значения пористости МДО-покрытий может положительно повлиять на качество их работы в смазочной среде.

Исследование влияния концентрации жидкого стекла на маслоемкость покрытий при синтезе в электролите на повышенной плотности тока на аноде показало, что повышение концентрации в электролите Na_2SiO_3 при постоянных остальных параметрах процесса приводит к росту маслоемкости покрытий (рисунок 3а)



а *б*

Рис. 3. Зависимость маслоемкости покрытий от *(а)* концентрации Na_2SiO_3 в электролите (Т = 1,5 часа; C_{KOH} = 2 г/л, $Д_Т$ = 25 А/дм^2) и *(б)* от плотности тока (Т = 90 мин, C_{KOH} = 2 г/л, $C_{Na2SiO3}$= 15 г/л): *1* – сплав АК7ч; *2* – сплав АО3-7

Такая зависимость обусловлена тем, что с увеличением концентрации пассиватора, которым является жидкое стекло, происходит ускорение синтеза МДО-покрытий из-за роста мощности микроплазменных разрядов.

С повышением энергии микродугового разряда увеличиваются размеры кристаллов МДО-покрытия, вследствие чего микродуговые разряды появляются на более удаленном расстоянии друг от друга, не успевая сплавлять границы образующихся кристаллов [9, 10], что ведет к повышению процента пористости.

Исследование влияния плотности тока на маслоемкость покрытий при остальных постоянных параметрах процесса показало, что независимо от марки сплава, подвергаемого

микродуговому оксидированию, с ростом плотности тока повышается и маслоемкость покрытий (рисунок 3б) по аналогичной причине.

Таким образом, установлено, что существует возможность варьировать маслоемкость МДО-покрытий с помощью изменения параметров процесса микродугового оксидирования. Очевидно, что для алюминиевых деталей с МДО-покрытиями, предназначенных для работы в парах трения, целесообразно рекомендовать покрытия с повышенной маслоемкостью.

Выводы

1) Исследованы триботехнические свойства композиционных покрытий, полученных комбинацией методов МДО и ХГДН, установлено, что износостойкость упрочненных МДО алюминиевых покрытий, сформированных «холодным» газодинамическим напылением, примерно в 3,1…3,3 раза выше износостойкости не упрочненных покрытий и в 2,2…2,5 раза выше износостойкости алюминиевого сплава АК7ч, принятого за эталон сравнения. Следует отметить, что износостойкость упрочненных методом МДО алюминиевых покрытий, несколько ниже износостойкости оксидно-керамических покрытий, полученных непосредственно на алюминиевых сплавах.

2) Разработана технология создания антифрикционных композиционных покрытий, позволяющая использовать пористую структуру поверхностного слоя МДО-покрытия как матрицу для формирования композиционных покрытий с улучшенными триботехническими характеристиками, за счет заполнения пористости поверхности МДО-покрытия никелем, который работает как твердосмазочный материал в процессе трения. Исследованы триботехнические свойства композиционных антифрикционных покрытий МДО-Ni, установлено, что заполнение пор МДО-покрытий никелем снижает коэффициент трения, что обеспечивает повышение износостойкости поверхностей трения по сравнению с традиционными МДО-покрытиями.

3) Установлено, что существует возможность варьировать маслоемкость МДО-покрытий с помощью изменения параметров процесса микродугового оксидирования. Экспериментально обосновано влияние токовых характеристик и концентрации силикатно-щелочного электролита на маслоемкость формируемых керамических покрытий в процессе микродугового оксидирования алюминия.

Библиографический список

1. **Holmberg, K.** Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, Second Edition / K. Holmberg, A. Matthews / vol. № 56, B. Briscoe, Ed., Elsevier Science: Tribology and Interface Engineering Series, -2009, -p. 576.

2. **Солнцев, Ю.П.** Материаловедение / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, Ф. Войкун // СПб.: Изд.: Химия. -2002, -696 с.

3. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Том 2 / И.В. Суминов [и др.] // Москва: Техносфера, -2011, - 512 с.

4. Холодное газодинамическое напыление / А.П. Алхимов [и др.] // Новосибирск: Физматлит, -2010. - 536 с.

5. **Пат. 2543584 Российская Федерация. МПК C25 D 3/12.** Электролит на водной основе для никелирования изделий из стали, алюминия, титана, меди и их сплавов / А.В. Красиков, А.А. Ежов; № 2013134110/02; заявл. 19.07.13; опубл. 10.03.15.

6. Особенности механической обработки оксидно-керамических покрытий, полученных плазменно-электролитическим оксидированием / Ю.А. Кузнецов [и др.] // Технология металлов. -2017. -№ 10. -С. 18-24.

7. **Готовцев, А.А.** Проектирование цепных передач / А.А. Готовцев, И.П. Котенок / Справочник //Москва: Машиностроение, - 1982, 336 с.

8. Гальванотехника / Справочник. / Ф.Ф. Ажогин и др. // Металлургия, - 1987, - 736 с.

9. **Снежко, Л.А.** Энергетические параметры процесса получения силикатных покрытий на алюминии в режиме искрового разряда / Л.А. Снежко, В.И. Черненко // Электронная обработка материалов, -1983, - т. 110, - № 2, - с. 25-28.

10. **Каракозов, Э.С.** Микродуговое оксидирование — перспективный процесс получения керамических покрытий / Э.С. Каракозов, А.В. Чавдаров, Н.В. Барыкин //Сварочное производство, - 1993, -Т. 6, С. 4—7.

УДК 621.791 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_312

В.А. Глазунов, д-р техн. наук, **А.Ю. Албагачиев,** д-р техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аннотация. *Рассмотрены теплофизические аналитические модели расчета температуры применительно к сварке трением с перемешиванием. Предложена модель оценки суммарных остаточных напряжений, включающая алгебраическую сумму механических, температурных и напряжений от структурно-фазовых превращений, протекающих в сварочном шве.*

Thermophysical analytical models for calculating temperature as applied to friction stir welding are considered. A model for assessing the total residual stresses is proposed, including the algebraic sum of mechanical, temperature and stresses from structural-phase transformations occurring in the weld.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, температура, модель, остаточные напряжения
Keywords: friction stir welding, temperature, model, residual stresses

Введение

Сварка трением с перемещиванием (СТП) трудносвариваемых материалов прочно вошла в технологию 21 века. Ее используют при получении неразъемных соединений как одноименных так разноименных металлов и полимерных материалов в авиакосмической, судовой, железнодорожной и других транспортных отраслях. Бурное развитие СТП получила в зарубежных производствах ведущих стран мира.

Сущность метода СТП – вращающийся инструмент перемещается по стыку свариваемых деталей с нормальной нагрузкой (рис.1.)

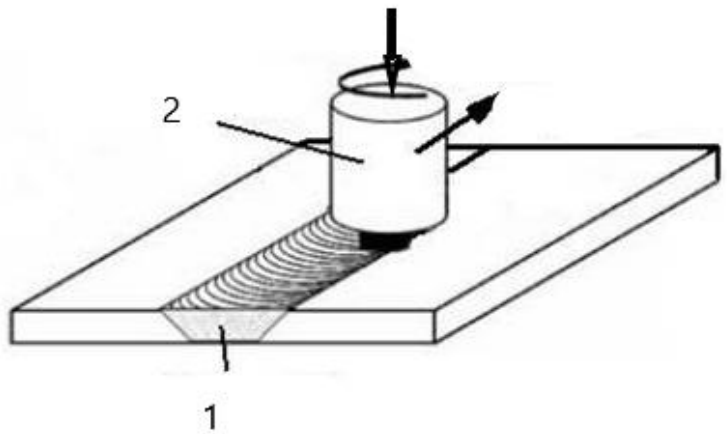


Рис. 1. Схема сварки трения с перемешиванием:
1 - сварочный шов; *2* - инструмент (заплечик с пином)

Вместе с несомненным преимуществом СТП перед существующим сотней видов сварки (сварка осуществляется без подвода электромагнитной энергии для плавления и специального защитного инертного газа, метод достаточно прост в реализации – вращающийся инструмент состоящий из заплечика и пина перемещаясь в зоне стыка осуществляет с высокой производительностью сварку при относительно невысокой температуре) имеет существенные недостатки: формирование несимметричного шва вследствие неравномерного съема материала со стыкуемых кромок и его переноса; вращающийся инструмент оставляет на поверхности шва приливы; изгибающие нагрузки и температура возникающие при перемещении инструмента, создают высокую вероятность его разрушения; частицы пленки оксида, которая не удаляется даже в вакууме при нагреве, так как температура его плавления составляет около 2000 ^{0}C, после разрушения пином попадают в сварочный шов снижая его качество и усталостную прочность; набегающая и отстающая стороны имеют отличающие скорости , давления и температуры.

Теоретическими (численными методами) и экспериментальными зарубежными и отечественными исследованиями установлено: для получения сварочного шва необходимо осуществить 3 этапа – разрушение и удаление оксидных пленок на свариваемых металлических поверхностях, сближение поверхностей на расстояние, соизмеримое с периодом кристаллической решетки, осуществление объемного взаимодействия тел с их последующей сваркой. При этом после сварки образуются три области: перемешивания, термомеханического воздействия, термического влияния. В технологии сварки особый интерес представляет минимальное значение температуры сплава, при котором образуется сварное соединение без дефектов. Это позволило бы рассчитывать максимально возможные режимы сварки и повышать производительность способа.

Для оптимизации и управлением процессом СТП необходимо исследовать температурный режим и давление в заплечике, пине и остаточные напряжения сварочном шве. В данной работе на основе теоретического анализа предложены математические модели для расчета температуры, остаточных напряжений полученные авторами. Наличие составного инструмента, состоящего из заплечика и пина с различными выполняемыми ими функциями и условиями их работы, а также образование трех областей с различными температурами и свойствами затрудняет однозначный подбор моделей для расчета. Пин инструмента предназначен для удаления оксидных пленок сдвиговой пластической деформацией по толщине свариваемых объектов, перемешивания, а также интенсификации процесса активации свариваемых поверхностей. Заплечик сжимая с большим давлением поверхность создает деформации сдвига и осуществляет нагрев. В худших условиях находится конический пин, который в нижней своей части на перемешивает, а сдвигает в стыке свариваемый металл. Максимальные значения температуры достигаются на поверхности деталей в плоскости контакта с заплечиком инструмента. Тепловая мощность генерируется как в области, примыкающей непосредственно к узкому пину, так и под относительно широким заплечиком. Соотношение мощностей, выделяемых непосредственно в области контактов с образцом пина и заплечика составляет примерно w=0,3.

Из-за разных скоростей и давлений мощность теплового источника на опережающей и отстающей поверхностях свариваемых объектов будут различными. В результате градиент температуры, величина теплового источника будут больше на отстающей поверхности. В теоретических исследованиях следует учитывать такое положение. что материал при перемешивании находящийся на отстающей поверхности будут подвергаться более высокому температурному воздействию, его скорость обтекания пина ниже, а давление больше чем на опережающей.

Аналитические модели температуры и остаточных напряжений

Генерируемый тепловой поток при трении и сдвиговых деформациях СТП распределяется между инструментом из легированной стали (заплечик, пин) и свариваемыми материалами, а также между самими свариваемыми материалами. Важность определения коэффициента распределения тепловых потоков при разработке теплофизических моделей является очевидной.

При расчете **коэффициента распределения теплового потока** при неподвижном источнике теплоты используют формулу Шаррона:

$$\alpha_{ТП} = \frac{\sqrt{\lambda_1 \rho_1 C_1}}{\sqrt{\lambda_1 \rho_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_2}}$$

где $\lambda_1 \rho_1 C_1$ и $\lambda_2 \rho_2 C_2$ - теплопроводности, плотности, теплоемкости контактирующих тел.

При малых скоростях перемещения источника тепла – инструмента при СТП коэффициент можно определять по Х. Блоку:

$$\alpha_{ТП} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (1)$$

При больших скоростях перемещения инструмента при СТП коэффициент следует определять по Д. Егеру:

$$\alpha_{ТП} = \frac{1,25\lambda_1 a_2^{1/2}}{1,25\lambda_1 a_2^{1/2} + \lambda_2 \left(\frac{lV}{2}\right)^{1/2}}, \quad (2)$$

где a_2-температуропроводность металла,

l, V-соответственно протяженность контакта и скорость.

Отметим, что скорости движения источника теплоты определяют по числу Пекле $\left(Pe = \frac{Vl}{a}\right)$.

При неподвижном источнике Pe=0, при движении с малой скоростью 0 < Pe < 0,3, при движении с большими скоростями 0,3 < Pe >8 и весьма с большими скоростями Pe >40.

Режим нагрева

Максимально мощный источник тепла возникает при трении вращения и сдвиге пары заплечик – свариваемые поверхности.

Температурный режим при трении заплечика по сварочному шву сведем к решению дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z} \quad (3)$$

С начальным и граничным условием:

$$\theta = 0 \text{ при } t=0 \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{(1-\alpha_{ТП}) fPV\left(\frac{t}{\Delta t} - \frac{t^2}{\Delta t^2}\right)}{A} \quad (5)$$

$$\theta = 0 \text{ при } z \longrightarrow \infty \quad (6)$$

Уравнение (3) решали операционным исчислением.

$$\theta(z,t) = \frac{(1-\alpha_{ТП}) fPVt}{A\lambda\Delta t\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) \left[2\sqrt{at}\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - \sqrt{\pi} z erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)\right] \quad (7)$$

где *P*- сила;

V - результирующая скорость (корень из суммы квадратов скоростей вращения и перемещения);

Δt- время контакта;

t- текущее время;

z - координата.

Для моделирования теплообмена между движущемся пином и перемешивающимися текучими свариваемыми металлическими телами следует рассматривать трехмерную модель теплопроводности Фурье.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}\right) \tag{8}$$

Решение дифференциального уравнения для мгновенного неподвижного источника тепла было получено Кельвином в следующем виде

$$\theta = \frac{Q}{4\rho c\ (\pi a t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right), \tag{9}$$

где *Q* - количество теплоты;

c – теплоемкость.

Из (9) получена формула расчета температуры при напряжениях сдвига материала создаваемым стационарно вращающимся и движущемся пином

$$\theta = \frac{(1-\alpha_{TП})\tau V t}{4\rho c\ (\pi a t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{V}{2a}(x+R)\right), \tag{10}$$

где τ - напряжения сдвига.

Режим охлаждения

Если принять регулярный тепловой режим охлаждения нагретого инструмента или материала как основной (без учета неустойчивого первого кратковременного периода) модель режима охлаждения можно представить в виде:

$$\theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{k\sigma S}{c\rho V}\right),$$

где θ_0 - температура окружающей среды;

k -коэффициент неравномерности температурного поля (равен отношению средних температур поверхности и объема);

S-площадь;

V –объем;

σ -коэффициент теплоотдачи.

Модель расчета внутренних напряжений в сварочном шве

На усталостную прочность сварочного шва после СТП отрицательно влияют трещины и растягивающие напряжения. Их определение рентгеновским методом связаны с большими временными и финансовыми затратами. Поэтому их можно оценивать расчетным путем. Авторами предлагается аналитическая модель расчета суммарных остаточных напряжений в сварочном шве получаемым при сварке пластин или деталей из разных металлов.

При СТП необходимо обеспечить качество сварочного шва. Он подвергается силовому воздействию, быстрому нагреву и охлаждению, в нем протекают структурно-фазовые превращения, возникает наклеп. Все это приводит к формированию остаточных напряжений разных знаков. Предлагаемая математическая модель для оценки остаточных напряжений

формирующихся в сварочном шве при СТП учитывает механо-температурное воздействие и протекающие в результате этого структурно-фазовые превращения.

$$\sigma_{сум} = -\sigma_{сил} + \sigma_{темп} \pm \sigma_{стр} \tag{11}$$

где $\sigma_{сил}$ - силовые остаточные напряжения;

$\sigma_{темп}$ - температурные;

$\sigma_{стр}$ - остаточные напряжения от структурно-фазовых превращений.

Силовые остаточные напряжения

Осевые:

$$\sigma_z = \sigma_т \left(\frac{3a^2}{2(a^2+z^2)} + 0{,}3\ln\left(\frac{z}{2a}\right) - 0{,}3 \right), \tag{12}$$

Тангенциальные:

$$\sigma_x = 1{,}5\sigma_т \left[-\frac{0{,}5a^2}{a^2+x^2} + (1-\nu)\left(1 - \frac{x}{a}\operatorname{arctg}\frac{a}{x}\right)\right] + 0{,}2\sigma_т \ln\left(\frac{x}{2a}\right), \tag{13}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PR}{4}\left(\frac{1-\nu^2}{E_1} + \frac{1-\nu^2}{E_2}\right)}$$

где $\sigma_т$ - предел текучести металла значение которого выбирается при перемешивании.

Температурные растягивающие напряжения, возникшие в результате нагрева и охлаждения в сварочном шве можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_{тем} = \alpha E \Theta / (1-\nu) \tag{14}$$

где α -коэффициент линейного расширения;

Θ - температура;

E-модуль упругости;

ν - коэффициент Пуассона.

Температуру следует рассчитывать по формуле (7) и значение подставить в (14).

Остаточные напряжения от структурных и фазовых превращений в шве:

$$\sigma = \frac{E}{3}\left(1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}}\right) \tag{15}$$

где ρ_1, ρ_2 - плотности структур.

Если плотность структуры до превращения была меньше чем после него, то в этом случае возникают остаточные напряжения растяжения и наоборот. Плотность различных структурных составляющих сталей имеет следующие значения кг/м^3; перлит - 7800; троостит - 7808…7830; мартенсит - 7760; аустенит - 8150; феррит - 7900; цементит - 7700.

Таким образом предложены аналитические зависимости для проведения инженерных теплофизических расчетов и остаточных напряжений. По ним можно проводить оптимизацию режимов сварки (скоростей вращения и перемещения инструмента и давлений) при СТП обратным путем, т.е. подставляя оптимальную, полученную экспериментальным путем, температуру (например, 400^{0}С при сварке алюминия с алюминием) в формулы и определяя по ним рациональные скорость и давление. По такой же процедуре можно оптимизировать и остаточные напряжения.

УДК 621.891+06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_317

В.А. Кохановский, д-р техн. наук, **Н.В. Нихотина** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ПРИРАБОТКА ФТОРОПЛАСТСОДАРЖАЩИХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

Аннотация. *В статье приведены результаты экспериментальных исследований работы металлополимерной фторопластсодержащей трибосистемы при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы.*

The article presents the results of experimental studies of the operation of a metal-polymer fluoroplast-containing tribosystem with a coefficient of mutual overlap less than one.

Ключевые слова: покрытие из полимерного фторопластсодержащего композита, коэффициент взаимного перекрытия, триботехнические параметры.
Keywords: coating of polymer fluoroplastic-containing composite, coefficient of mutual overlap, tribotechnical parameters.

Антифрикционные самосмазывающиеся фторопластсодержащие композиционные покрытия нашли применение в самых разных областях машиностроения, включая авиакосмическую и транспортную технику [1]. Материал покрытий представляет собой композит с армирующей компонентой в виде полуторослойной ткани из двух типов нитей: антифрикционных фторопластовых (полифен) и прочных-полиимидных (аримид Т). Ткань выполнена таким образом, что на рабочую поверхность выведены только фторопластовые нити (полифен), а на изнанку – в основном полиимидные. Ткань пропитана матричным фенолоформальдегиднокаучуковым связующим и им же приклеена к металлической поверхности детали. [2].

Покрытия предназначены для эксплуатации при относительно низких скоростях скольжения (0,1 – 0,3 м/с), и высоких контактных нагрузках (до 250 МПа) [3]. В современных машинах очень часто применяются механизмы, совершающие поступательное и возвратно-поступательное движение. В этих условиях, связи со значительной работой трения, интенсивно изменяется температурная нагрузка, являющаяся серьезным фактором, определяющим работоспособность полимерных покрытий.

Известно, что при движении подобных трибосистем изменение температурной нагрузки определяется коэффициентом взаимного перекрытия ($К_{вз}$). Этот коэффициент является отношение меньшей контактной площади к наибольшей. В настоящее время сведения о применении этих материалов в условиях поступательного движения при коэффициенте взаимного перекрытия ($К_{вз}$) меньше единицы в доступной литературе отсутствуют.

Кроме того, известно, что существенный вклад в величину ресурса рассматриваемой металлополимерной трибосистемы вносит правильно сформированный процесс приработки. Нарушение оптимальных приработочных режимов может снизить ресурс узла на 20% [4].

Следует отметить также, что особенностью механизма трения ПТФЭ является адгезионный перенос в виде его дискретной пленки на поверхность ответной металлической детали – контртела [5]. При $К_{вз}$ меньше единице существенно изменяется не только температурные условия работы трибосистемы, но и увеличивается величина переноса ПТФЭ на поверхность контртела [6].

Выполняя функции смазочного материала, фторопласт переносится с малой поверхности образца с покрытием на гораздо большую поверхность. Повышенный расход смазочного материала (ПТФЭ) полностью изменяет, а такие важные триботехнические эксплуатационные характеристики металлополимерной трибосистемы, как несущая

способность и ресурс. Зависимость этих параметров от нагрузочно-скоростных режимов трибосопряжения и рассматривается в настоящей статье при коэффициенте взаимного перекрытия равном $К_{ВЗ}$= 0,476 <1.

Экспериментальные исследования проводились на специальном стенде с кривошипно-шатунным приводом, обеспечивающим возвратно-поступательные движения стального ползуна (контертело) по направляющей с полимерным фторопластсодержащим покрытием.

Экспериментальные исследования выполнялись в соответствии с полнофакторным двухуровневым планом типа 2^2. Матрица экспериментального плана представлена в таблице 1. Количество параллельных опытов равнялось трем. Полученные результаты обрабатывались статистически.

Контртела, перемещающиеся в направляющей, представляют собой валики из стали 45, размером Ø14×200 мм, со шлифованной полированной поверхностью до 10 класса шероховатости. Образцы выполнены в виде двух одновременно работающих полувтулок с полимерным покрытием установленных в пружинное нагружающее устройство. Индикатор часового типа, встроенный в нагружающее устройство, позволяет устанавливать нагрузку и определить величину текущего износа покрытий. Нагрузка осуществлялась при помощи пружины. Средние контактные напряжения рассчитывались по проекции вала.

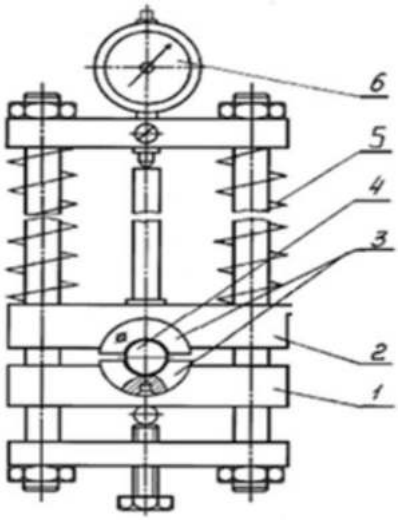


Рис. 1. Нагружающее устройство схема

Принятая конструкция (рисунок 1) обеспечивает нагружение витыми пружинами с мягкой характеристикой. Износ покрытий, изменяя степень сжатия пружин незначительно влияет на величину нагружающего усилия. На схеме обозначено: 1 и 2 – нижняя и верхняя опорные планки, 3 – образцы с покрытием, 4 – валик-контртело, 5 – тарированные нагружающие пружины, 6 – индикатор часового типа. Величина текущего износа покрытий определяется одновременно для двух образцов без разборки нагружающего устройства при замене индикатора на рычажно-зубчатую головку ИГ с точностью до 0,001мм. Варьирование скорости электродвигателя стенда выполнялось частотным регулятором.

Таблица 1

Исходные данные ПФЭ 2^2

№	Переменные факторы		Уровни исследований			Интервал варьирования
	Наименование	Размерность	верхний	нижний	средний	
1	Контактные напряжения, σ	МПа	22	5	13,5	8,5
2	Средняя скорость скольжения, V	м/с	0,27	0,12	0,195	0,075

При экспериментальных исследованиях в выбранном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов и приведенного выше $К_{вз}$ определялись следующие триботехнические параметры приработочного периода эксплуатации: величина приработочного износа и время приработки. Статистическая обработка результатов ПФЭ 2^2 позволила получить регрессионные модели зависимости этих параметров от контактной нагрузки и скорости скольжения. Регрессионные модели в натуральных переменных имеют однотипную структуру следующего вида:

для приработочного износа

$$h_{\text{пр}} = 10^{-0,281} \cdot \sigma^{-0,118} \cdot V^{1,741 \cdot lg\sigma - 0,773}, \quad (1)$$

и для времени приработки

$$t_{\text{пр}} = 10^{1,134} \cdot \sigma^{0,031} \cdot V^{0,244 - 0,655 \cdot lg\sigma}. \quad (2)$$

В формулах обозначено:

σ – нормальные контактные напряжения, МПа

V – скорость скольжения, м/с.

Для обеспечения однородности результатов и повышения точности моделей расчет проводился по логарифмам выхода и включал статистически значимые смешанные взаимодействия.

Все модели адекватны и при расчетах обеспечивают погрешность не более 5%. Оби модели включают смешанные взаимодействия, что свидетельствует о значимости их общего воздействия на параметр приработки.

График полученной регрессионной модели зависимости приработочного износа от нагрузочно-скоростных режимовисследуемой трибосистемы представлено на рисунке 2.

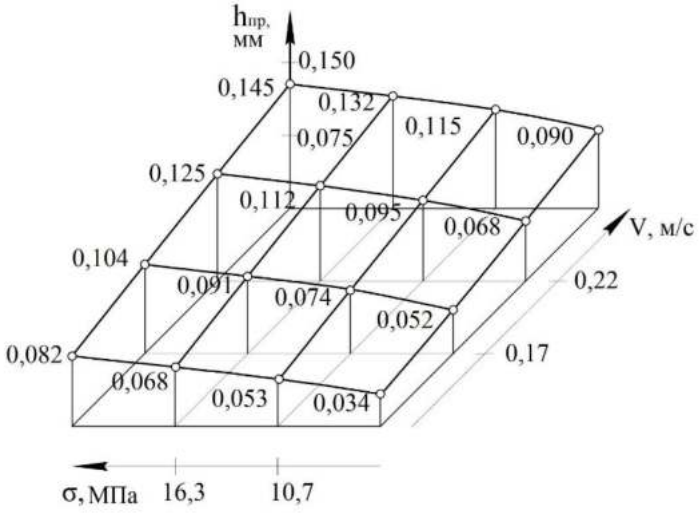


Рис. 2. Влияние нагрузочно-скоростных режимов на величину приработочного износа антифрикционного покрытия при Квз=0,476

Анализ модели показывает, что в исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов наибольшая величина приработочного износа составляет 0,145 мм или 26,3% от исходной толщины покрытия, что соответствует в порядках данным для аналогичных материалов [?]. Общее влияние на величину приработочного износа контактных напряжений и скорости скольжения находится в пределах 51– 59%. Однако влияние на приработочный износ нормальных напряжений составляет в среднем 101%, а скорости скольжения – 69%. Таким образом большее влияние на приработочный износ оказывает скорость, что может быть объяснено ее большем влиянием на контактную температуру. Последняя значительно снижает механические свойства и износостойкость полимерного композита.

Графическая интерпретация модели зависимости времени приработки от эксплуатационных режимов представлено на рисунке 2.

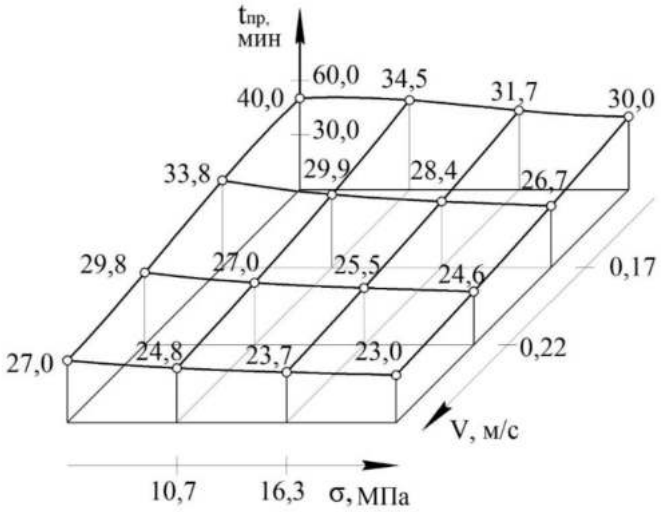


Рис. 3. Влияние нагрузочно-скоростных режимов на величину времени приработки антифрикционного покрытия при Квз=0,476

Общий анализ модели (2) показывает, что в исследованной области режимных параметров полученная зависимость времени приработки имеет обратную зависимость в сравнении предыдущей моделью (1). Общее влияние на величину времени приработки в исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов находится в пределах 25– 39%. При этом имеет место на 14% большее влияние скорости скольжения, чем нормальных контактных напряжений.

Таким образом, в результате выполненного комплекса исследований приработочных параметров металлополимерной трибосистемы с антифрикционными композиционными фторопластсодержащими покрытиями получены следующие результаты.

1. Впервые выполнены исследования приработки металлополимерных трибосистем с при возвратно-поступательном движении и коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы, $К_{вз} = 0,476$.

2. В результате экспериментальных исследований получены регрессионные модели влияния нагрузочно-скоростных режимов на параметры приработки: контактные напряжения и скорость скольжения.

3. Установлено, что в исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов наибольшее влияние оказывается на величину приработочного износа (51– 59%) и меньшее– на время приработки (25– 39%.).

4. Отмечено, что при увеличении контактных напряжений растет величина приработочного износа и одновременно сокращается время приработки, что объясняется ростом температуры, снижающим механические свойства полимера.

Библиографический список

1. Gleitlager aus Fasermaterial // Production.–1971.-Bd.10.№5.-S.65-68

2. **Кохановский, В.А.** Покрытия из самосмазывающихся волокнитов для подшипников скольжения / В.А. Кохановский, А.В. Кузичев, В.А. Салион // Вестник машиностроения.-1986.-№5.-С.40-43.

3. **Кохановский, В.А.** Износостойкость металлополимерных трибосистем с композиционным покрытием / В.А. Кохановский // Трение и смазка в машинах и механизмах - 2007.- №1.- С.13 – 19

4. **Евдокимов, Ю.А.** Тепловая задача металлополимерных трибосопряжений / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, С.А. Подрезов // Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1987.-166с

5. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый [и др.] // Минск: Наука и техника, 1976.-431с.

6. **Бартенев, Г.М.** Трение и износ полимеров / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев // Л.: Химия, 1972-237с.

УДК 620.191.3+06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_321

Л.А. Кармазина, канд. техн. наук, **В.Н. Кротов,** канд. техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения), **С.М. Меньших** (Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева)

СВЯЗЬ СТРУКТУРЫ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЕЙ БАНДАЖЕЙ КОЛЕС ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ

Аннотация. *Исследована стойкость бандажей колес железнодорожного подвижного состава против износа, повреждений тормозного и контактно-усталостного типов. Рассмотрены причины образования и развития повреждений. Проанализированы основные мероприятия по их предупреждению.*

The resistance of the wheel bands of railway rolling stock against wear, damage of brake and contact fatigue types is investigated. The reasons of formation and development of damages are considered. The main measures for their prevention are analyzed.

Ключевые слова: Бандаж колес тягового подвижного состава, износ, контактная усталость, тормозные дефекты.
Keywords: Traction rolling stock wheel brace, wear, contact fatigue, brake defects.

В процессе эксплуатации колес железнодорожного подвижного состава появляются повреждения, характер которых определяется, с одной стороны, взаимодействием между колесом и рельсом, а с другой стороны, качественными характеристиками колесной стали и особенностями структуры металла колес. Исследованиям повреждений бандажных колес посвящен ряд работ. В результате этих работ установлено, что продольные трещины образуются вследствие наличия остатков околоусадочной раковины и ликвационных включений, по которым распространяется прогрессивно растущая трещина усталости под действием переменных усилий, возникающих в службе между колесом и рельсов. Поперечные трещины на бандажах образуются в результате ряда причин, а также вследствие наличия таких же остатков околоусадочной ликвации. Описанные пороки приводят к безусловному забракованию колеса.

Причины появления продольных и поперечных трещин достаточно изучены и связаны с дефектами производства. Более того, известны мероприятия по сокращению эти пороков (введение комплектных слитков, удаление усадочной раковины и околоусадочной ликвационной зоны в обрезаемую часть слитка, утепление слитков).

При повышенной нагрузке на ось, а также при уменьшенном диаметре колес, большое распространение получили различные поверхностные повреждения, которые отличаются между собой как по внешнему признаку, так и по природе их возникновения.

Нами наблюдались в службе в основном четыре вида повреждений поверхности катания колес и бандажей, непосредственно связанных со свойствами колесной стали:

- износ, как результат истирания и деформации металла;
- выщербины усталостного типа (иногда их называют раковинами, отслоениями, питтингами, оспинами и т. д.);

- выщербины тормозного типа;
- отколы наружной грани обода колеса.

Одним из наиболее распространенных пороков являются выщербины усталостного типа, которые представляют собой разрушения поверхности катания, образующиеся в результате роста трещины усталости под действием переменных контактных напряжений.

Выщербины усталостного типа, кроме колес железнодорожного подвижного состава, образуются также на зубьях зубчатых передач, подшипниках качения и т.д.

Наблюдениями установлено, что на поверхности катания колес выщербины усталостного типа имеют разнообразную форму.

На рис. 1 представлено усталостное разрушение поверхности катания бандажа колеса в начальной стадии своего развития. Это разрушение имеет вид сравнительно тонких пластин, достаточно легко отделяющихся от поверхности колеса. С течением времени трещины развиваются вглубь обода колеса или бандажа иногда на значительную глубину (порядка до 15 мм). В дальнейшем по этим трещинам происходит выкрашивание металла с поверхности катания бандажа. В результате образуются единичные выщербины (рис. 2, *а*, *б*) или выщербины, распространяющиеся непрерывной полосой по всей поверхности катания колеса (рис. 3). В этом случае, как это можно видеть на приведенной фотографии, повреждения настолько значительны, что возникает опасность не только порчи рельсов от ударов колес, но и возможность разрыва самого бандажа. Однако следует отметить, что случай поломки бандажа вследствие наличия поверхностной выщербины на поверхности катания редки.

Рис. 1. Усталостное разрушение поверхности катания бандажа колеса в начальной стадии своего развития

а

б

Рис. 2. Единичные выщербины на поверхности катания бандажа

Удаление указанных повреждений производится обточкой поверхности катания; так как трещины в этих случаях распространяются на значительную глубину, приходится снимать большой объем металла, что удорожает процесс обточки и сокращает срок службы колеса.

Повреждения поверхности катания колес тормозного типа имеют характерную особенность в том, что их возникновение связано как с проскальзыванием колеса по рельсу, так и с воздействием тормозных колодок на колесо при торможении.

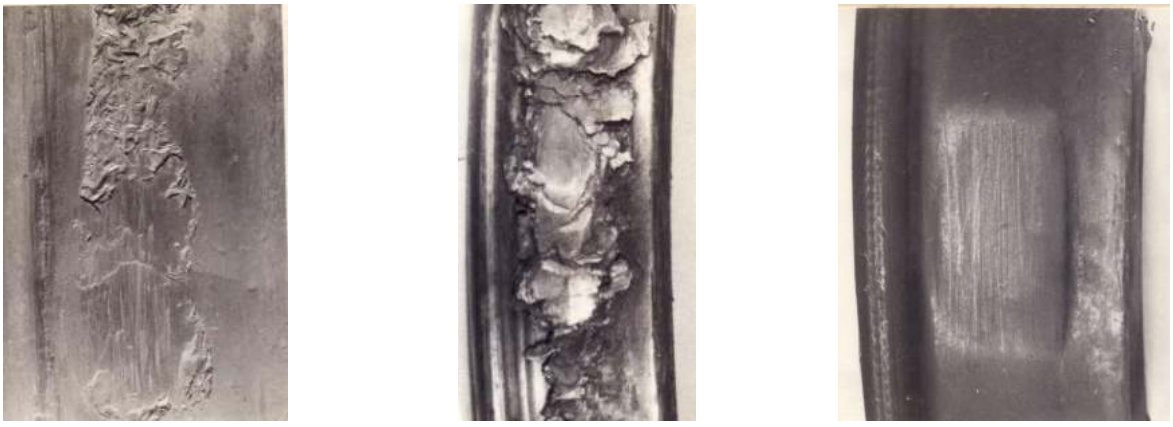
В результате на поверхности катания образуются три вида тормозных повреждений:

- ползуны (рис. 4, *а*);
- выкрашивание «твердого» слоя под действием высоких напряжений в контакте колеса с рельсов (рис. 4, *б*);
- наволакивание металла (рис. 4, *в*) – смещение поверхностных слоев относительно основного металла колеса.

Рис. 3. Выщербины, распространяющиеся непрерывной полосой по всей поверхности катания колеса

Следует отметить, что сильно развитые ползуны наблюдаются одновременно на обоих колесах. Небольшие ползуны, либо сдвиги металла в зоне около средней линии катания, иногда встречаются только на одном из колес колесной пары, без заметного повреждения второго колеса в точке, расположенной по одной образующей.

Повреждения тормозного типа на одном колесе могут образовываться, например, при движении колесной пары в кривых участках профиля пути, где одно из колес проскальзывает по рельсу; при применении тормозных башмаков, которые подкладываются обычно под одно из колес, в результате чего одно колесо скользит на башмаке, а другое – по рельсу; возможно также закатывание на одном из колес тормозных повреждений, первоначально образовавшихся на обоих колесах.



а *а* *в*

Рис. 4. Тормозные повреждения на поверхности катания вагонных колес: *а* – выщербина тормозного типа; *б* – наволакивание металла; *в* – ползун

Отколы наружной грани обода бандажа колеса имеют место в той части поверхности катания, которая сопряжена с внешней боковой поверхностью обода колеса. Поверхность излома выходит, с одной стороны, на эту внешнюю боковую поверхность, а с другой стороны – на поверхность катания. Таким образом замыкается достаточно большой объем металла, который удаляется с поверхности катания колеса (рис. 5, *а*, *б*).

На фотографии видно, что разрушение представляет собой результат прогрессивно растущей трещины усталости, которая берет свое начало от одного или нескольких концентраторов напряжений. Концентраторами напряжений в этом случае (см. рис. 5, *а*) служат остатки ликвационных и неметаллических включений, которые не полностью удаляются при обрезке головных заготовок слитков.

а *б*

Рис. 5. Отколы наружной грани обода бандажей колес: *а* – откол, вызванный засорами стали неметаллическими включениями; *б* – откол, вызванный износом из-за пластической деформации на наружную грань обода

Значительный размер повреждений поверхности катания представляет прямую угрозу безопасности движения поездов, вследствие чего колесо с наличием откола подлежит окончательной браковке. В некоторых случаях производится обточка поверхности катания, но она сопровождается значительным съемом металла с обоих колес. Это удорожает процесс обточки и сокращает срок службы колесной пары.

Возникает также вопрос о допустимом размере выщербин. Если считать, что длина выщербины определяется в продольном направлении по кругу катания, то из рассмотрения внешних видов дефектов видно (см. рис 2, *а*, *б*), что выщербины встречаются различной ширины: иногда они располагаются по средней линии катания узкой строчкой, имеющей ширину 15…20 мм, тогда как в других случаях, единичные выщербины имеют ширину более ширины головки рельса. Совершенно очевидно, что узкая полоска выщербин даже большой длины оказывает меньшее влияние на рельсы и на прочность самого рельса (или бандажа), чем широкая и даже сравнительно короткая по длине единичная выщербина. Поэтому следует учитывать размеры выщербины не только по длине, но по ширине. Ибо если ширина выщербины станет соразмерной с шириной головки рельса, то удары колеса о рельс будут такими же, как и от ползунов недопустимо большого размера.

В настоящее время существуют общепризнанные закономерности, которые определяют зависимость указанных повреждений от свойств колесной стали. Эти закономерности следующие.

Износостойкость стали тем выше, чем больше в ней содержание углерода; при равном содержании углерода тем выше, чем выше твердость; при равном содержании углерода и равной твердости тем выше, чем меньше была скорость охлаждения в интервале критических температур. Следовательно, для повышения износостойкости колес и бандажей необходимо изготовлять их из стали с высоким содержанием углерода и подвергать термической обработке с наименьшей возможной скоростью охлаждения в интервале критических температур, обеспечивающей наибольшую твердость, а также для предохранения колес от поломок, максимальную пластичность и вязкость.

Усталостная прочность при переменных контактных напряжениях изменяется с изменением свойств колесной стали в том же порядке, как и износостойкость. Усталостная прочность тем выше, чем больше содержание углерода, а также чем выше твердость (при заданном содержании углерода) и ниже скорость охлаждения в интервале критических температур.

Недостаточно ясным оставался механизм зарождения и развития усталостной трещины.

В настоящее время имеется три точки зрения о механизме развития выщербин усталостного типа:

- трещина усталости зарождается на некоторой глубине от поверхности катания в точке, соответствующей максимуму касательных напряжений;
- распространение трещины усталостного типа происходит от различного рода неметаллических включений;
- трещина усталости берет свое начало с поверхности катания сопрягаемых тел.

Кроме этого, микроскопические трещины могут появляться в «хрупкой корочке», образующейся при нагреве поверхности катания колеса вследствие скольжения его по рельсу, а также от воздействия тормозных колодок. От этих микротрещин выщербина усталостного типа не может брать свое начало. Хрупкая слаботравящаяся поверхностная корочка, насыщенная, по-видимому, кислородом и азотом, разрушается таким образом, что зародившаяся трещина никогда не переходит вглубь бандажа колеса, а распространяется вдоль границы этого слоя с основным металлом.

Выщербины тормозного типа чаще образуются не зимой, а в более теплое время года; твердая поверхностная корочка отличается от чистого мартенсита, а ее образование зависит не от закаливаемости стали, а, главным образом, от твердости и величины пластической деформации, которая имеет место при схватывании металла в контакте колеса с рельсом и с тормозными колодками во время торможения. При этом деформировании объем нагревается до температуры выше A_{C3}, а не A_{C1} и насыщается, по-видимому, кислородом и азотом воздуха. Вследствие охлаждения в бандаж колеса образуется закаленный слой толщиной порядка 1 мм, имеющий высокую твердость, резко отличающийся от основного металла.

Отколы, как типичные повреждения поверхности катания колес, чаще всего берут начало от остатков ликвационной зоны слитка, от которой берет свое начало трещина усталости. В отдельных случаях образование отколов происходило от наличия в бандаже «периферической зональности», а также включений глинозема.

Выкрашивание металла на поверхности катания колес встречается достаточно часто и наблюдается достаточно давно, и в случае большой нагрузки на ось, развиваются весьма интенсивно.

Закалка с последующим отпуском бандажей способствует уменьшению количества выщербин. При этом роль термической обработки заключается в измельчении действительного зерна колесной стали. Сталь с мелким действительным зерном более устойчива против образования выщербин усталостного типа, чем сталь крупнозернистая. Кроме этого, легирование бандажей является эффективным средством борьбы с появлением выщербин на поверхности катания колес подвижного состава. Легированная сталь несомненно отличается большей способностью воспринимать закалку, чем углеродистая.

УДК 621.896+06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_326

Д.С. Мантуров, канд. техн. наук, **С.А. Данильченко**, **М.Д. Михайловская**, **А.И. Азоян**, **Е.Д. Аникина** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

Аннотация. *Рассмотрены результаты исследования механических и трибологических характеристик стали 45 после ультразвуковой упрочняющей обработки (УУО), под которой понимается поверхностное пластическое деформирование поверхности с помощью рабочего инструмента, совершающего ультразвуковые колебания и последующей модификацией при помощи лазерного облучения. Проведены комплексные металлофизические исследования модифицированных образцов. Установлено влияние различных способов модификации на структуру и показатель микротвердости поверхностного слоя. Исследовано влияние нагрузки вдавливания индентора при обработке материала. Обобщенные результаты сравнения объемного износа всех исследованных образцов представлены в виде гистограммы. Применение ультразвуковой упрочняющей обработки представляется весьма эффективным методом модифицирования поверхности нагруженных трибосопряжений транспортного машиностроения.*

The results of the study of the mechanical and tribological characteristics of steel 45 after ultrasonic hardening treatment, which is understood as surface plastic deformation of the surface using a working tool performing ultrasonic vibrations and subsequent modification by laser irradiation, are considered. Complex metallophysical studies of modified samples were carried out. The influence of various modification methods on the structure and microhardness index of the surface layer has been established. The influence of indentation load of the indenter during material processing is investigated. The generalized results of comparing the volume wear of all the samples studied are presented in the form of a histogram. The use of ultrasonic hardening treatment seems to be a very effective method of modifying the surface of loaded tribo-joints of transport engineering.

Ключевые слова: ультразвуковая упрочняющая обработка, поверхностное пластическое деформирование, концентрированные потоки энергии, лазерная обработка, механические свойства, трибологические испытания
Keywords: ultrasonic hardening treatment, surface plastic deformation, concentrated energy flows, laser treatment, mechanical properties, tribological tests

Введение

Простота технической реализации и высокие показатели после применения поверхностного пластического деформирования (ППД) выделяют этот метод среди других методов упрочнения поверхности [1-3]. ППД значительно снижает шероховатость поверхности и увеличивает микротвёрдость, что позволяет использовать метод ППД для финишной обработки поверхности деталей. Микротвёрдость может вырасти в 1,5 раза, а глубина упрочнённой зоны может достигать 3мм. Наиболее широко используются такие виды ППД как дробеструйная обработка, упрочнение обкатыванием, алмазное выглаживание, виброгалтование. Большое внимание требуется уделить контролю за режимами процесса ППД, т.к. возникновение значительных термопластических деформаций может привести к дефектам и изменению знака остаточных напряжений обработанной поверхности.

В основе технологии применения ППД для модификации поверхностного слоя лежит понимание того, что в процессе эволюции поверхностного слоя в результате взаимодействия с инструментом и окружающей средой формируется целый спектр неустойчивых структур, которые и определяют физико-механические характеристики материала. В результате существенно уменьшается трение и увеличивается пластичность зоны обработки, что

способствует сглаживанию шероховатости поверхности, создает сжимающие напряжения в поверхностном слое.

Одним из наиболее технологически доступных и эффективных методов модификации и упрочнения поверхности с применением КПЭ является лазерное облучение (ЛО) [4-6]. Повышение триботехнических свойств материалов при КПЭ-обработке осуществляют путем формирования на поверхности композиционных слоев, в которых керамические компоненты, обладающие высокой твердостью, инкорпорированы в матрицу из мягкого металла

Большое количество исследователей изучила теоретические модели и подходы к формированию лазерного облучения во время обработки сталей [7-9]. Огромное количество экспериментальных исследований установило взаимосвязь между условиями облучения, получаемыми структурами и свойствами сталей [10, 11]. Многочисленные производственные испытания лазерной закалки для обработки деталей машин [12-13] и режущих инструментов [14-15] также было проведено. Кроме того, на различных машиностроительных предприятиях процесс лазерной закалки по-прежнему является основным технологическим решением для термической обработки поверхности.

Наше исследование направлено на изучение влияния ППД и лазерного облучения на механические и трибологические свойства поверхности конструкционной углеродистой стали.

Материалы и методы исследования

В качестве материала образцов использована сталь 45 по ГОСТ 4543-71. Выбор этой стали в качестве объекта исследования обусловлен ее широким использованием в нагруженных трибосопряжениях транспортного машиностроения – зубчатых и червячных передачах, коленчатых и распределительных валов, цилиндров и т.п.

Для проведения испытаний были подготовлены следующие образцы:

№ 1. Эталонный - Сталь, прошедшая операции термической обработки (ТО).

№ 2. Сталь, прошедшая операции ЛО

№ 3. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 200Н)

№ 4. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 200Н), ЛО;

№ 5. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 300Н)

№ 6. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 300Н), ЛО;

№ 7. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 400Н)

№ 8. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 400Н), ЛО;

№ 9. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 500Н)

№ 10. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 500Н), ЛО;

№ 11. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 300Н), ЛО по шликерной обмазке с содержанием Al;

№ 12. Сталь, прошедшая операции УУО (нагрузка 300Н), ЛО по шликерной обмазке с содержанием Mo;

Обработка образцов методом УУО осуществлялась на установке импульсно-упрочняющей чистовой обработки наружных поверхностей деталей с рабочим инструментом (индентором) диаметром 6 мм при следующих режимах: частота 22 кГц, скорость 4 мм/с, нагрузка 200, 300, 400 и 500 Н, в среде масла ВМ-6.

Лазерная обработка проводилась при помощи волоконного лазера непрерывного излучения многомодульного типа RFL-C4000 фирмы RAYCUS. При использовании обмазок легирующие элементы довольно вяло диффундируют в твердых фазах зоны лазерного воздействия (ЗЛВ), предпочитая либо располагаться в очень узком (несколько межатомных расстояний) поверхностном слое ЗЛВ, либо вообще испаряясь. Поэтому для активизации диффузии легирующих элементов покрытий (обмазок) рекомендуется выбирать режимы ЛО с оплавлением.

Для всех подготовленных образцов проведены металлографические исследования с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert-40MAT и программного

обеспечения Thixomet. На приборе Affri DM8 методом Виккерса при нагрузке индентирования 2Н была определена микротвердость модифицированного поверхностного слоя.

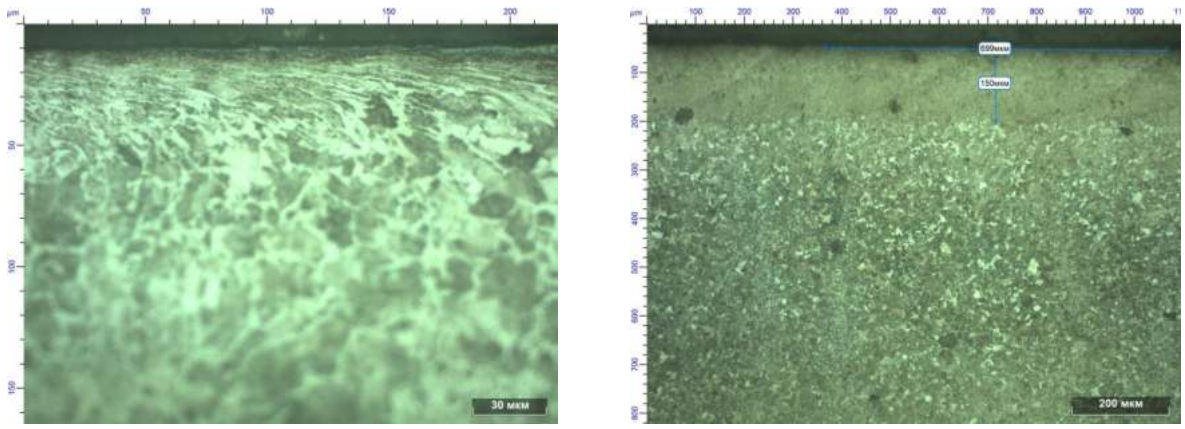
Сравнительные трибологические лабораторные испытания на износостойкость проводились на трибометре TRB с использованием методик DIN 50324 и ASTM G99. Режимы испытания: схема «шар-пластина», возвратно-поступательное движении пластины (образца) с амплитудой 4 мм при частоте 10 Гц, усилие на штифте составляло 10 Н. В качестве контртела применяли шарик диаметром 6 мм из электрокорунда Al_2O_3. Испытания в данном случае, когда одно из тел трибосопряжения неподвижно, относятся к типу трения скольжения. Продолжительность испытания составляла 12500 циклов.

Непрерывная запись силы трения и величины относительного перемещения испытываемых образцов производится в течение всего времени испытаний. По зафиксированным в процессе проведения трибологических испытаний значениям силы трения строились зависимости коэффициента трения от времени.

Для определения величины объёмного износа образца W_V использовался геометрический способ. Для этих целей применялся профилометр NewView600SWLI.

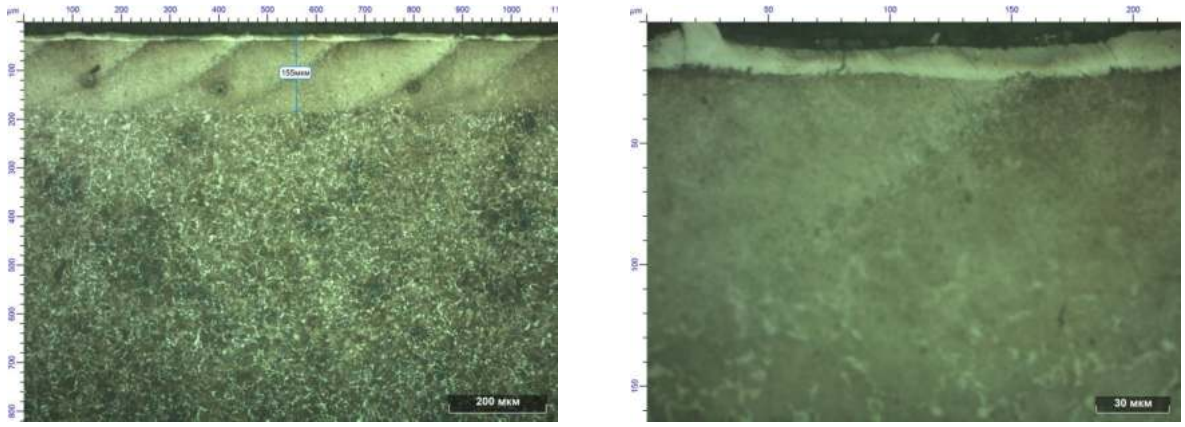
Результаты исследования и их обсуждение

Выполненные комплексные металлофизические исследования с использованием методик оптической микроскопии и индентирования показали, что у образцов, прошедших обработку методом ППД, наблюдается характерный приповерхностный слой с деформационными эффектами в структуре глубиной от 10 до 40 микрон (рисунок 1а). Микротвердость в данном случае возрастает на 27…58% в сравнении с исходной сталью в зависимости от прикладываемого усилия при ППД, при этом данная зависимость имеет линейный характер. Данные приведены в таблице 1. Результаты измерения микротвердости образцов, прошедших комбинированную обработку, демонстрируют, что при наложении ЛО на ППД микротвердость выше, чем при чистом ППД с аналогичными усилиями. Прирост наблюдается в небольшом приповерхностном слое глубиной до 50 мкм и составляет HV20-70, что свидетельствует о наличии эффекта совместного упрочнения. Структура поверхностного слоя данных образцов приведена на рисунке 1б. На образцах, прошедших комбинированную обработку со шликером, содержащим Мо-порошок, четко различима зона оплавления на поверхности образцов («белый слой») (рисунок 2) глубиной 10…15 мкм. Значение микротвердости в этой зоне возросли на 32% в сравнении с образцом без шликера, прошедшим обработку с аналогичными режимами ППД и ЛО.



а *б*

Рис. 1. Структура образцов из стали 45 после обработки методом ППД *(а)* и комбинированным методом обработки ППД + ЛО *(б)*



а *б*

Рис. 2. Структура образцов из стали 45 после комбинированной обработки ППД + ЛО со шликером, содержащим порошок Mo

Таблица 1

Микротвердость образцов с различными видами обработки поверхности

№ образца	Микротвердость на поверхности в зоне обработки, HV	Микротвердость на границе модифицированной зоны и основного металла, HV
1	250	
2	490	286
3	318	252
4	499	269
5	338	268
6	575	282
7	363	262
8	522	267
9	395	314
10	517	279
11	485	280
12	760	426

Кинетику процесса изнашивания образцов в условиях трибологических испытаний характеризуют зависимости коэффициента трения μ от пути трения l. Такие зависимости, полученные на машине трения TRB, представлены на рисунках 3-6.

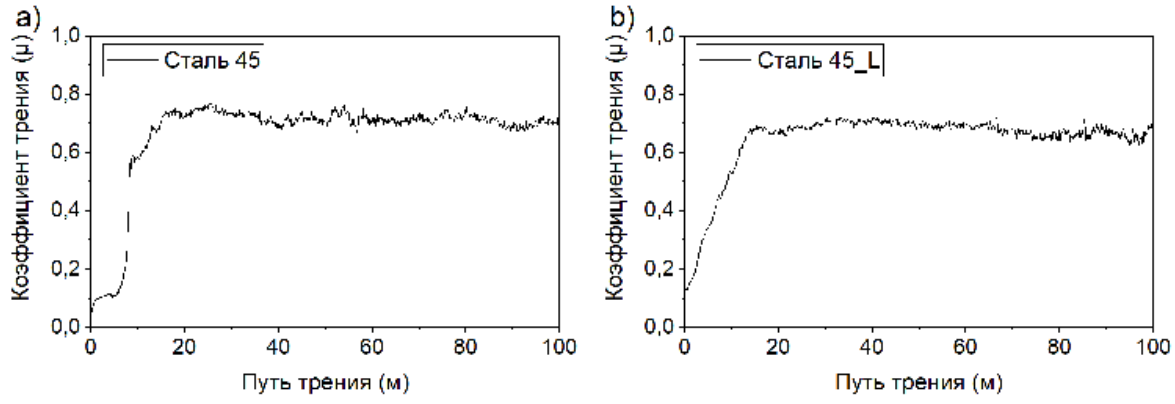


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от пройденного пути
a – образец №1, *b* – образец №2

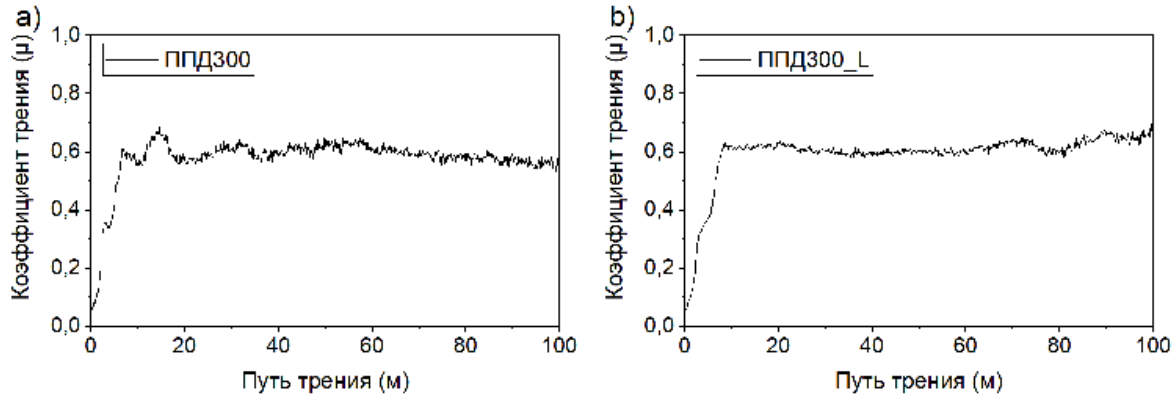


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от пройденного пути
a – образец №5, *b* – образец №6.

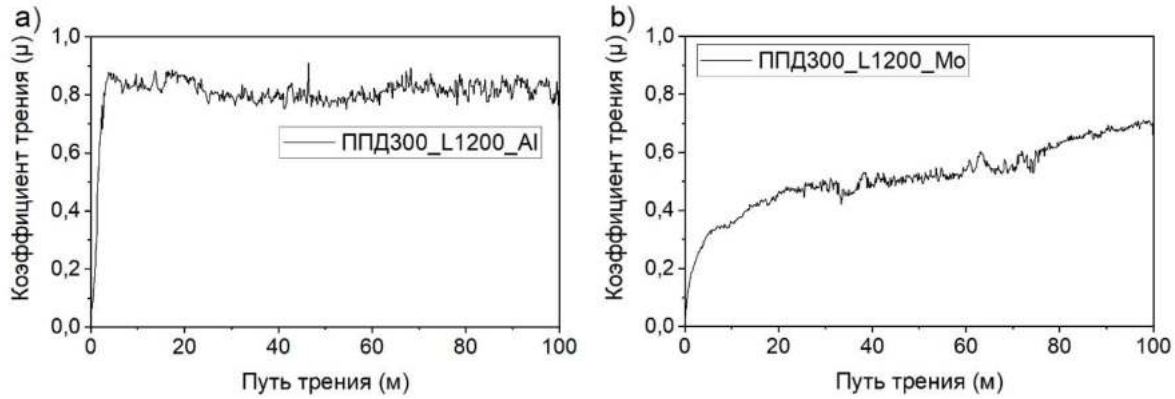


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от пройденного пути
a – образец №11, *b* – образец №12.

На рисунке 5 приведены данные объемного износа образцов при продолжительности испытаний 12500 циклов. Показатели износа у образцов, прошедших ЛО и у образцов с обработкой УУО примерно одного порядка. Износ же образцов предварительно обработанных методом ППД (усилие 300Н) и КПЭ (мощность 1200) по шликерной обмазке (в составе Mo) меньше в 1,5 раза, чем у образцов без применения шликера.

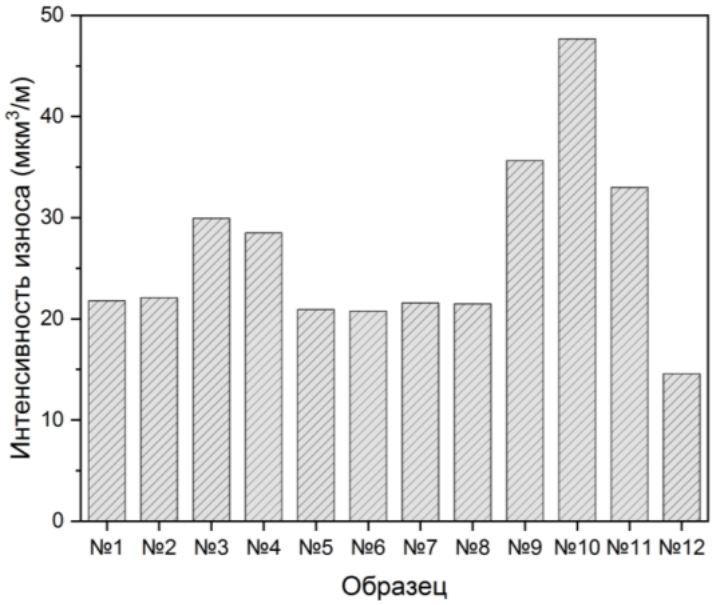


Рис. 6. Сравнение объемного износа при трибологических испытаниях

Полученные результаты показывают, что величина нагружения индентора на установке импульсно-упрочняющей чистовой обработки влияет на износостойкость конструкционной стали, в отличие от последующей обработки ЛО. Существенным образом, при проделанной обработки, на износостойкость влияет внедрение в процесс комбинированной обработки шликерных составов. При таком подходе элементы основы и плакированного слоя диффундируют и реагируют друг с другом, что приводит к образованию фаз MoC и т.д. с высокой твердостью и хорошей износостойкостью.

Выводы

Использование комбинированной технологии, включающей поверхностное пластическое деформирование с наложением ультразвуковых колебаний и обработку КПЭ, представляется весьма эффективным методом модифицирования поверхности трибосопряжения.

Ультразвуковая упрочняющая обработка позволяет обеспечить быструю стабилизацию коэффициента трения и более устойчивую кинетику процесса трения.

У образцов, прошедших обработку методом ППД, наблюдается характерный приповерхностный слой с деформационными эффектами в структуре глубиной от 10 до 40 микрон. Микротвердость в данном случае возрастает на 27...58% в сравнении с исходной сталью в зависимости от прикладываемого усилия при ППД.

На образцах, прошедших комбинированную обработку со шликером, содержащим Mo-порошок, четко различима зона оплавления на поверхности образцов («белый слой»). Значение микротвердости в этой зоне возросли на 32% в сравнении с образцом без шликера, прошедшим обработку с аналогичными режимами ППД и ЛО.

Введение упрочняющих элементов, таких как Mo, снижает значение коэффициента трения и интенсивность изнашивания у образцов, подвергнутых комбинированной обработке ППД и КПЭ.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (протокол от 09.02.2021 г. № АИ-6).

Библиографический список

1. **Одинцов, Л.Г.** Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / Л.Г. Одинцов – М.: Машиностроение. – 1981. – 160 с.

2. **Папшев, Д.Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев – М.: Машиностроение. – 1978. – 152 с.

3. **Каледин Б.А.** Повышение долговечности детали поверхностным деформированием / Б.А. Каледин, П.А. Чепа – Минск: Наука и техника. – 1974. – 231 с.

4. **Козаков, А.Т.** Модификация и анализ поверхности сталей и сплавов / А.Т. Козаков, С.И. Яресько, А.В. Сидашов – Ростов-на-Дону: Изд-во ФГБОУ ВПО РГУПС. – 2015. – 378 с.

5. **Dwivedi, D.K.** Surface Engineering: Enhancing Life of Tribological Components. / D.K. Dwivedi – Springer India, 2018. – 224 p.

6. **Pellizzari, M.** Hot friction and wear behavior of high-speed steel and high chromium iron for rolls / M. Pellizzari, D. Cescato, M.G. De Flora // Wear. – 2005. – Vol. 259. – P. 1281-1289.

7. **Steen, W.M.** Laser Material Processing / W.M. Steen, J. Mazumder // Springer-Verlag, London. – 2010. – P. 422.

8. **Labudovic, M.** Three-Dimensional Finite Element Modeling of Laser Surface Modification / M. Labudovic, D. Hu, R. Kovacevic // Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. of Eng. Manufacture – 2000 – Vol. 214. – P. 683 – 692

9. **Fakir, R.** Numerical Investigation by the Finite Difference Method of the Laser Hardening Process Applied to AISI-4340 / R. Fakir, N. Barka, J. Brousseau, G. Caron-Guillemette // Journal of Applied Mathematics and Physics . – 2018. – Vol. 6. – P. 2087 – 2106

10. **Safonov, A.N.** Structure And Microhardness of the Surface Layers of Iron-Carbon Alloys after Laser Heat Treatment / A.N. Safonov // Met. Sci. Heat Treat. – 1996 – Vol. 38 – P. 68 – 74

11. **Chaus, A.S.** Formation of Structure of a High-Speed Steel upon Laser Surface Melting / A.S. Chaus, A.V. Maksimenko, N.N. Fedosenko, L. Caplovic, V.N. Myshkovets // Phys. Met. Metall. – 2019 – Vol. 120 (3) – P. 269 – 277

12. **Yao, J.** Laser Hardening Techniques on Steam Turbine Blade and Application / J. Yao, Q. Zhang, F. Kong, Q. Ding // Physics Procedia – 2010 – Vol. 5 – P. 399 – 406

13. **Lima, de M.S.F.** Laser Surface Remelting and Hardening of an Automotive Shaft Sing a High-power Fiber Laser / M.S.F. de Lima, F.A. Goia, R. Riva, A.M. do Espírito Santo // Materials Research, – 2007– Vol. 10 (4) – P. 461-467.

14. **Safonov, A.N.** Hardening the Surface of Tools Made of High-Speed Steel Using Continuous CO2 Lasers / A.N. Safonov, N.F. Zelentsova, A.A. Mitrofanov, V.V. Vasil'tsov, I.N. Il'ichev // Weld. Int. – 1997 – Vol. 11 (2) – P. 152 – 155

15. **Kargapol'tsev, S.K.** Laser Modification of Metal Cutting Tool: Assessment of the Influence on Wear Resistance and Quality of the Processed Surface / S.K. Kargapol'tsev, V.I. Shastin, V. E. Gozbenko // Key Engineering Materials – 2020 – Vol. 836 – P. 118-123

УДК 669.718: 621.9.048 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_332

С.К. Муканов, М.И. Петржик, д-р техн. наук, **А.Е. Кудряшов,** канд. техн. наук, **Е.А. Левашов,** д-р техн. наук, (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»)

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ СЭЛС СПЛАВА ВТ6 АМОРФНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$

Аннотация. *Представлены результаты исследования влияния электроискровой обработки электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ с высокой стеклообразующей способностью на износостойкость титанового сплава ВТ6, полученного селективным электронно-лучевым сплавлением.*

The results of the study of the effect of electric spark treatment with $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ electrode with high glass-forming ability on the wear resistance of titanium alloy VT6 obtained by selective electron beam fusion are presented.

Ключевые слова: электроискровая обработка, селективно электронно-лучевое сплавление, сплав ВТ6, износостойкость, стеклообразующая способность
Keywords: electric spark treatment, selective electron beam melting, VT6 alloy, wear resistance, glass-forming ability

Введение

К одной из важнейших задач современного материаловедения относится разработка легких конструкций, применяемых авиационно-космической отрасли, автомобилестроении, атомной и газотурбинной промышленности. В частности, получение деталей по аддитивной технологии селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС) на основе титана позволяет существенно понизить массу конструкции, а также сократить время производства [1, 2]. Однако деталям полученным данным способом свойственна повышенная шероховатость поверхности. Кроме того, применение титана и его сплавов ограниченно

низкой износостойкостью из-за высокой склонности к схватыванию, что приводит к адгезионному износу деталей во время эксплуатации. Таким образом повышение износостойкости СЭЛС титанового сплава становится важной и актуальной проблемой.

Решить ее позволяет применение электроискровой обработки (ЭИО) легкоплавкими электродами деталей из титановых сплавов, выращенных СЭЛС. Использование околоэвтектических литых электродов с высокой стеклообразующей способностью, полученных методом вакуумной металлургии, для ЭИО экспериментально показано в [3, 4]. ЭИО проводили литыми электродами $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ и $Fe_{61}Ni_4Cr_3Nb_8Mn_4Si_2B_{18}$ на подложках из стали и титанового сплава ВТ20. Термический анализ электродов после ЭИО показал, что несмотря на воздействие искровых импульсов электроды сохранили своё аморфное состояние. ЭИО аморфными электродами позволила увеличить твердость в 3 раза и износостойкость на три порядка титанового сплава ВТ20 [3]. Преимуществом данных электродов является их химическая и структурная однородность, характерная для металлических стекол. Химическая однородность электродов обеспечивает склонность к глубокому переохлаждению расплава, что позволяет получать модифицированные поверхности при ЭИО с аморфно-нанокристаллической структурой.

Целью данной работы является исследование влияния ЭИО аморфным электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ на износостойкость титанового сплава, полученного селективным электронно-лучевым сплавлением.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны титановые сплавы ВТ6 (масс. %: 83,74 Ti; 10,98 Al; 4,08 V; 0,57 O; 0,24 Si; 0,24 Mo; 0,15 Mo) приготовленные СЭЛС [1] размером 14 мм × 12 мм × 10 мм. Для повышения износостойкости объекты исследования были подвергнуты электроискровой обработке электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ (способность к переохлаждению ΔT=38 ºС). Электроискровую обработку СЭЛС образца ВТ6 проводили в среде аргона с использованием инструмента вибрационного типа. Режим обработки: I - 120 А; τ - 20 мкс; U - 20 В; E – 48 мДж; f -3200 Гц; $\sum E$ – 9,21 кДж×мин.

Фазовый состав поверхностных слоев до/после ЭИО проводили на автоматизированном дифрактометре D2 PHASER (Bruker AXS, Германия) с использованием немонохроматизированного Cu Kα-излучения ($\lambda k\alpha$ = 0,15418 нм). Количественный и качественный фазовый рентгеноструктурный анализ проводили в программе DIFFRAC.EVA (Bruker AXS, Германия) с возможностью использования базы данных ICDD PDF-2, PDF-4.

Трибологические испытания образцов проводили на машине трения «Tribometer» (CSM Instruments, Швейцария по схеме «стержень-пластина». Стержень связан датчиками перемещения замеряющие отклонение стержня от первоначального положения, которое пропорционально силе трения скольжения для пары трения, что позволяет установить экспериментально значение коэффициента трения в определенный момент времени. Условия испытаний: длина дорожки 4 мм, прикладываемая нагрузка 1 и 2 Н, максимальная скорость 5 см/с, контртело – шарик 100Cr6 и WC-Co Ø 3 мм. После испытаний образцы были очищены от продуктов износа в ультразвуковой ванне. Исследование топографии поверхности и профиля бороздки износа для расчета износа проводили на оптическом профилометре WYKO NT 1100 (VEECO, США).

Экспериментальные результаты

На рисунке 1 представлен внешний вид электрода с типичным для аморфной структуры сколом и поверхности после ЭИО. Электроискровой слой на поверхности образца с металлическим блеском и достаточной сплошностью был сформирован за 5 минут обработки. Необработанных участков и бугров, свойственных электроискровым поверхностям, образованных на не оптимальных режимах обработки, не обнаружено.

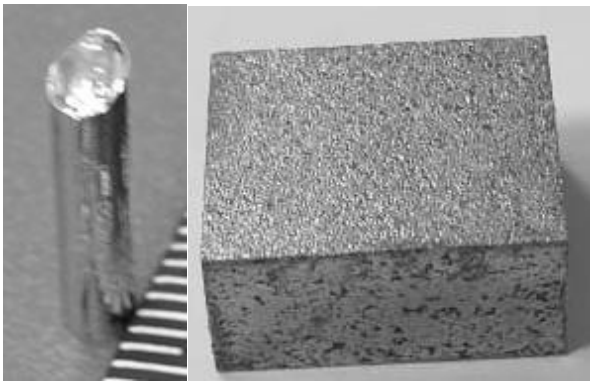


Рис. 1. Внешний вид электрода на фоне миллиметровой линейки и электроискровой поверхности

В таблице 1 приведен фазовый состав модифицированного слоя, образованного электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$. По данным РФА, в результате ЭИО произошло взаимодействие химически активного титана с элементами электрода, образовав кубический карбид TiC_{1-x} и интерметаллид FeTi. Также обнаружен результат взаимодействие элементов подложки ВТ6 (Al и V) с электродом, при котором образованы гексагональные фазы $Ti(FeAl)_2$ и $(TiV_{2-y})C$.

Таблица 1

Фазовый состав СЭЛС образца ВТ6 после ЭИО электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$

Фаза	Доля, мас. %	Период, нм	
		(a)	(c)
TiC_{1-x}	44,8	0,8558	-
$Ti(FeAl)_2$	27,5	0,4920	0,7988
$(TiV_{2-y})C$	14,6	0,2904	0,4640
FeTi	13,1	0,3153	-

Результаты исследования топографии поверхности модифицированного слоя представлены в таблице 2. Электроискровая обработка СЭЛС образца ВТ6 электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ приводит к оплавлению выступов и заполнению неровностей расплавом, формирующимся искровыми импульсами. В результате ЭИО наблюдается уменьшение средней шероховатости поверхности в 11 раз.

Таблица 2

Шероховатость поверхности образцов

Образец	R_a, мкм	R_z, мкм
Исходный СЭЛС сплав ВТ6	38,75 ± 3,00	221,72 ± 38
СЭЛС сплав ВТ6 + ЭИО электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$	3,53 ± 0,31	36,19 ± 5

По результатам трибологических испытаний СЭЛС образца с модифицированным ЭИ слоем и исходного СЭЛС сплава ВТ6, определены зависимости коэффициента трения от количества циклов скольжения контртела по поверхности образцов (рисунок 2).

Найдено. что в ходе трибологического испытания модифицированного слоя происходил исключительно износ контртела из стали 100Cr6. По мере увеличения приложенной нагрузки с 1 Н до 2 Н износ стального контртела увеличился с 3,18 до 3,84 (10^{-5}·мм^3/Н/м), соответственно (таблица 3). Износ контртела и увеличение площади контакта

в процессе трения привело к повышению установившегося (конечного) коэффициента трения до 0,36 (1 Н) и до 0,36 (2 Н).

Поскольку при испытании, используя данное контртело, износа модифицированного слоя не наблюдалось было принято решение использовать в качестве материала контртела WC-Co. Показано, что использование более твердого материала контртела (WC-Co) привело к понижению установившегося коэффициента трения до 0,28 и износу модифицированного слоя $34{,}10 \cdot 10^{-5} \cdot мм^3/Н/м$.

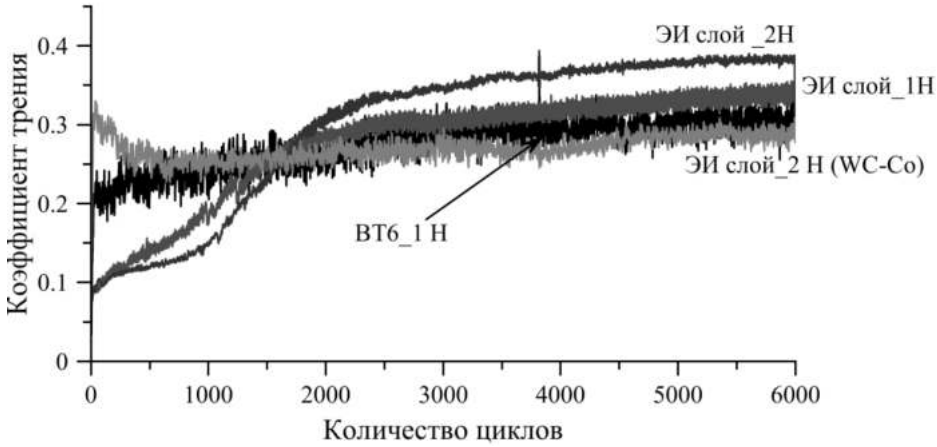


Рис. 2. Экспериментальные зависимости коэффициента трения от количества циклов

Таблица 3

Результаты трибологических испытаний

Образец	P, Н	Износ, $10^{-5} \cdot мм^3/Н/м$		Коэффициент трения		
		образца	контртела	Нач.	Ср.	Конечный
СЭЛС ВТ6 (100Cr6)	1	159,60	налипание	0,72	0,29	0,33
ЭИ слой (100Cr6)	1	Нет износа	3,18	0,01	0,28	0,36
ЭИ слой (100Cr6)	2	Нет износа	3,84	0,06	0,29	0,39
ЭИ слой (WC-Co)	2	34,10	налипание	0,19	0,28	0,28

Заключение

Таким образом, по результатам комплексных исследований продемонстрировано, что электроискровая обработка СЭЛС сплава ВТ6 электродом $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}Y_2C_{15}B_6$ с высокой стеклообразующей способностью позволяет повысить износостойкость поверхности за счет химического взаимодействия элементов основы (Ti) и электрода (Fe, C), при котором образуются карбидные и интерметаллидные фазы (TiC_{1-x}, FeTi).

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-58-18022) в части улучшения качества поверхностей, полученных с помощью аддитивных технологий, а также при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (проект № 0718-2020-0034) в части микроскопии структурно-фазовых превращений.

Библиографический список

1. Перспективные направления исследований в области аддитивных технологий, реализуемые АО «Композит» / Ж.А. Сентюрина [и др.] // Сборник статей 14-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». – 2020. – С. 604 -608.

2. **Каблов, Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е. Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии – 2015. – № 1. – С. 3 - 33.

3. **Petrzhik, M.** On conditions of bulk and surface glass formation of metallic alloys. Journal of Alloys and Compounds / M. Petrzhik, V. Molokanov, E. Levashov // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – V. 707. P. 68-72.

4. From bulk metallic glasses to amorphous metallic coatings / Petrzhik, M.I. [et Al.] // J. Metastable and Nanocrystalline Mat. – 2005. – V. 24-25. – P. 101-104.

УДК: 620.193/197:622.692.4 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_336

К.В. Наконечная, О.Ю. Елагина, д-р техн. наук (Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский институт) имени И.М. Губкина)

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВНУТРЕННИХ ПОКРЫТИЙ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АБРАЗИВА

Аннотация. *Проведено исследование на стойкость внутреннего антикоррозионного защитного покрытия промысловых труб к воздействию эксплуатационных сред с наличием абразива.*
A study was carried out on the resistance of the internal anti-corrosion protective coating of fishing pipes to the effects of operating environments with the presence of abrasive.

Ключевые слова: Линейный износ, интенсивность изнашивания, коэффициента деградации, внутреннее защитное покрытие.
Keywords: linear wear, wear intensity, degradation coefficient, internal protective coating.

По статистике одной из распространенных проблем промысловых трубопроводов является разрушение в результате коррозионно-механического износа. Для увеличения срока службы и снижения коррозионного воздействия промысловой среды на металл труб их внутреннюю поверхность защищают различными защитными полимерными покрытиями. Но наличие в промысловой сред механических примесей, необходимость очистки внутренней полости трубопровода от отложений и многократно повторяемых сбросов давления, характерных для промысловых трубопроводов, приводит к изнашиванию, отслаиванию и вздутию покрытий. Тем самым возникает необходимость разработки методики по оценке долговечности этих покрытий [4].

В работе исследовалась стойкость внутреннего антикоррозионного защитного покрытия промысловых труб к длительному воздействию эксплуатационных сред.

Были проведены ряд испытаний, таких как:

- испытаний на гидроабразивное изнашивание внутренних покрытий трубопроводов;
- испытаний внутренних защитных покрытий на стойкость к истиранию при очистке от солевых и асфальто-смоляных отложений.

Испытания проводились в имитационных средах в соответствии с ГОСТ Р 58346-2019, представленные в таблице 1.

Образцы с внутренними эпоксидными покрытиями для испытаний были взяты различных производителей, которые, в свою очередь, были укрупнено разбиты на две группы:

- однослойные покрытия, полученные с использованием двухкомпонентных жидких эпоксидных составов;
- двухслойные порошковые эпоксидные покрытия, состоящие из грунтовочного слоя и защитного слоя.

Таблица 1

Испытательные среды по ГОСТ Р 58346-2019

Обозначение среды	Испытательные среды
В1	Вода дистиллированная при температуре эксплуатации покрытия, выдержка 1000 ч
В2	Имитатор нефтепродуктов - смесь 50 % о-ксилола и 50 % толуола (плюс 20±3 0С), выдержка 1000 ч
В5	Водный раствор натрий хлор с массовой долей 5% + газовая фаза CO2 под давлением (2,0 ± 0.5) МПа + N2 под давлением (3.0 ± 0.5) МПа, выдержка 240 ч, сброс давления не менее 10 мин
В6	Водный раствор натрий хлор с массовой долей 5% + газовая фаза CO2 под давлением (5,0 ± 0.5) В5МПа + N2 под давлением (3.0 ± 0.5) МПа, выдержка 24 ч, сброс давления не более 5 с
В7	Среда воздушная плюс 60±3 0С до минус 60±3 0С (15 циклов) по ГОСТ 27037

Испытания на гидроабразивное изнашивание внутренних покрытий проводились в два этапа. На первом из которых износостойкость покрытия оценивалась с использованием методики испытаний по ASTM G65, значения износа внутреннего покрытия, полученные с помощью этой методики, характеризуют его разрушение при движении гидроабразивного потока под углом к поверхности трубы, не превышающим 45^0.

Для оценки влияния угла атаки на износ внутреннего покрытия на поворотных участках трубопровода на втором этапе. Испытаний проводились под углами 45^0 и 90^0, что позволило оценить вклад угла атаки в величину износа внутреннего покрытия.

На стадиях обоих этапов использовалось следующее оборудования и материалы:

- установка на трение по ASTM G65 на сыпучий абразив,
- модернизированная установка на гидроабразиваное изнашивание,
- профилограф-профилометр или стойка с индикатором перемещения с диапазоном измерений минимум 0 - 1,0 мм с погрешностью не хуже 0,01 мм,
- песок кварцевый природный по ГОСТ 6139-78 с размером частиц (160÷200) мкм.

Пример внешнего вида образцов до и после 1 этапа испытаний представлен на рисунке

Рис. 1. Внешний вида образцов до и после испытаний

Результаты испытаний образцов внутренних покрытий разных производителей п методике ASTM G65 представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сводные результаты испытаний по стойкости полимерных покрытий к действию сыпучего абразива по ASTM G65

Значения		Однослойное покрытие тип 5	Двухслойное покрытие тип 2	Двухслойное покрытие тип 3	Однослойное покрытие тип 6
Линейный износ, мкм	Min	506	503	562	769
	Max	541	541	615	885
	Среднее	519	517	592	827
Среднеквадратическое отклонение, мкм		±17,69	±19,2	±26,58	±58
Удельная скорость изнашивания ($v_{Г/АБР}$), мм/(г/м^3 ч)		$5,8*10^{-5}$	$5,8*10^{-5}$	$6,6*10^{-5}$	$9,2*10^{-5}$

Обработка результатов испытаний второго этапа показала, что использованный метод испытаний характеризуется большим разбросом значений и высокой неточность измерения линейного износа из-за неровности исходной поверхности образцов. Вместе с тем, сопоставление средних результатов испытаний показало значительное влияние угла атаки на показатели стойкости покрытия к действию гидроабразивной струи (рисунок 2).

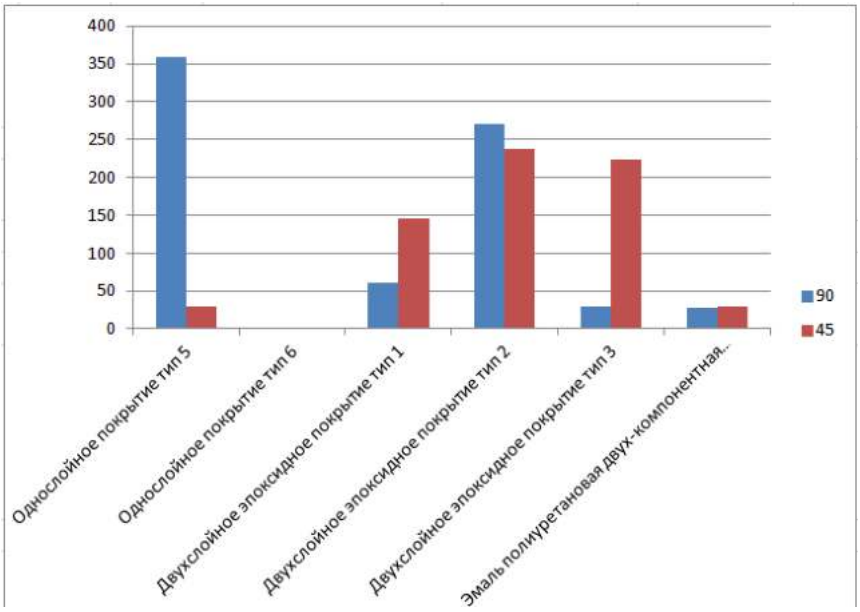


Рис. 2. Диаграмма изменения линейного износа образцов внутренних покрытий разных производителей в зависимости от угла атаки гидроабразивной струи

Как видно из представленных данных, линейному износу больше подвержены однослойные покрытия при угле атаки 90^0, а двухслойные покрытия - при угле атаки 45^0.

Расчет величины износа в результате гидроабарзивного износа из-за ниличия механических примесей в потоке промысловой среды предложено проводить по следующей формуле:

$$И_{Г/АБР} = Т_{исх} - v_{Г/АБР} * Q * t, [мм] \quad (1)$$

где: Тисх - толщина покрытия, мм,

$v_{Г/АБР}$ – скорости изнашивания внутреннего покрытия, мкм/(г/м3 ч),

Q – концентрация абразива в транспортируемой продукции, г/м3,

t – длительность эксплуатации при залповом выбросе абразива, ч.

Испытаний внутренних защитных покрытий на стойкость к истиранию при очистке от солевых и асфальто-смоляных отложений проводились по методу испытаний по Таберу, включенный в ГОСТ Р 58346-2019 реализует схему трения покрытия по монолитному абразиву. Для использования результатов лабораторных испытаний при оценке долговечности покрытия необходимо определять линейный износ покрытия на дорожке трения. Полученные значения позволят рассчитать интенсивность изнашивания покрытия при его контакте с очистным устройством. Если принять единичный цикл контакта с абразивным кругом при лабораторных испытаниях за один цикл очистки полости трубопровода, то полученные значения позволят прогнозировать потерю толщины покрытия от этого рода воздействий за фактическое время эксплуатации трубопровода и принятой частоты проведения очистных работ.

Для определения величины линейного износа, получаемого при испытаниях по Таберу, были выполнены испытания образцов с двумя типами покрытий и измерен линейный износ образцов методом профилометрии (таблица 3)

Как видно из полученных данных разброс значений линейного износа составляет 5% и 71% соответственно. Интенсивность изнашивания за один цикл очистки для исследованных типов покрытий составила 0,056 мкм/цикл и 0,082 мкм/цикл.

С использованием полученных значений может быть рассчитан ориентировочный срок службы покрытия по следующей зависимости:

$$И_{СОиАСПО} = Т_{исх} - i * n, [мм] \quad (2)$$

где: Тисх - толщина покрытия, мкм,

i – интенсивность изнашивания, мкм/(цикл),

n – количество операций по чистке полости участка трубопровода, циклы.

Таблица 3

Сводные результаты испытаний износостойкости при скольжении по монолитному абразиву (метод Табера) для образцов с разными типами покрытий

№ образца	Линейный износ, мкм	
	Однослойное покрытие тип 5	Эмаль полиуретановая двух-компонентная тип 4
1	26	78
2	16	85
3	126	83
среднее	56±71%	82±5%
Интенсивность изнашивания на 1 цикл	0,056 мкм/цикл	0,082 мкм/цикл

С использованием полученных данных был выполнен расчет вероятности риска потери сплошности покрытия на участке нефтесборного трубопровода при следующих условиях эксплуатации:

- длительность эксплуатации при залповом выбросе абразива – 3 суток,
- количество операций по чистке полости участка трубопровода – 3 цикла очистки,
- содержание абразива в потоке на момент выброса – 3,0 г/л.

Величины износа для указанных условий эксплуатации можно рассчитать по выражениям (1) и (2).

Для расчета вероятности отказа внутренних покрытий было предложено использовать коэффициенты деградации свойств внутреннего покрытия от воздействия гидроабразивного потока и износа покрытия от контакта со скребком при очистке полости трубопровода от солевых отложений и АСПО, определяемые по следующей формуле:

$$К_{Г/АБР,СОиАСПО} = \frac{Т_{исх} - И_{Г/АБР,СОиАСПО}}{0{,}5 \cdot Т_{исх}} \quad (3)$$

где $И_{Г/СОиАСПО}$ – величина износа покрытия за фактическое время контакта с гидроабразивным потоком t и за проведенное число операций очистки трубопровода n, соответственно,

$Т_{исх}$ - исходной толщины.

Вероятность риска потери сплошности покрытия с использованием коэффициентов деградации свойств покрытия может быть определена по формуле:

$$Р_{ВП} = К_{В1} + К_{В2} + N \cdot К_{В5(В6)} + К_{Г/АБР} + m \cdot К_{В7} + К_{СОиАСПО} \quad (4)$$

где $К_{В1}$,$К_{В2}$- коэффициенты деградации (к.д.) свойств внутреннего покрытия от воздействия вода дистиллированная и имитации нефтепродуктов соответственно,

$К_{В5(В6)}$- к.д. единичного воздействия декомпрессии в средах В5 или В6;

$К_{В7}$- к.д. термоциклирования; $К_{Г/АБР}$,

$К_{СОиАСПО}$- коэффициенты деградации свойств от изнашивания;

N- фактического количества циклов (N) декомпрессии;

m- число циклов отключений трубопровода в зимний период.

Результаты расчета вклада изнашивающих факторов в вероятность потери сплошности покрытия приведены в таблице 4.

Проведя анализ полученных значений вероятностей по данным износа в указанных условиях эксплуатации видно, что вероятность потери сплошности внутреннего покрытия в результате гидроабразивного износа на порядок меньше, чем в результате истирании при очистке от солевых и асфальто-смоляных отложений.

Таблица 4

Вероятность риска потери сплошности покрытия под действием изнашивающих факторов на участке нефтесборного трубопровода

Тип покрытия	$К_{Г/АБ}$	$К_{СОиАСПО}$	Вероятность (Р), %	
			Г/АБ	СоиАСПО
Однослойное покрытие тип 5	0,0001	0,0025	0,01	0,25
Двухслойное покрытие тип 2	0,0002	0,0017	0,02	0,17

Таким образом, полученные зависимости позволяют прогнозировать вероятность потери сплошности покрытий в зависимости от видов и интенсивности изнашивающего воздействия.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 58346-2019 Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05.02.2019 № 16-ст: дата введения 2019-04-01. - Москва: Стандартинформ, 2019. - 22 с. - Текст: непосредственный

2. ГОСТ 32299-2013 Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва: стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28.08.2013 № 58-П: дата введения 2014-08-01. - Москва: Стандартинформ, 2014. - 10 с. - Текст: непосредственный

3. **Alkhimenko, A.** Corrosion testing of experimental steels for oilfield pipelines / A. Alkhimenko / E3S Web of Conferences 121, 01001 (2019)

4. **Kostitsyna, I.** Study of corrosion behavior of carbon and low-alloy steels in CO2-containing environments / I. Kostitsyna, A. Shakhmatov, A. Davydov / E3S Web Conf., 121 (2019)

5. **К.В. Наконечная.** Оценка долговечности внутренних покрытий промысловых трубопроводов / Наконечная К.В., Елагина О.Ю. / В сборнике: Техника и технологии машиностроения. Материалы X Международной научно-технической конференции. Редколлегия: Е.Н. Еремин (отв. ред.) [и др.]. Омск, 2021. С. 90-93.

УДК 62-233:674.05 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_341

Е.А. Памфилов, д-р техн. наук, **В.В. Капустин** (Брянский государственный технический университет)

НОВЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Аннотация. *Рассмотрены принципы формирования антифрикционных композиционных материалов с использованием в качестве матрицы искусственных и растительных полимеров, и вводимых в нее модифицирующих структурных составляющих. Предложены пути обеспечения повышенных триботехнических и теплофизических характеристик рассматриваемых материалов за счёт целесообразного применения оптимизирующих наполнителей и теплоаккумулирующих материалов. При этом обеспечивается повышение износостойкости подшипниковых материалов и снижение коэффициента трения, а также увеличивается теплоотводящая и демпфирующая способность.*

The principles of the formation of antifriction composite materials using artificial and plant polymers as a matrix and modifying structural components introduced into it are considered. The ways of ensuring increased tribotechnical and thermophysical characteristics of the materials under consideration due to the expedient use of optimizing fillers and heat storage materials are proposed. This provides an increase in the wear resistance of bearing materials and a decrease in the coefficient of friction, as well as an increase in heat dissipation and damping capacity.

Ключевые слова: антифрикционные материалы, композиты, теплоаккумулирующие материалы, легкоплавкие материалы, подшипники скольжения, износостойкость, теплофизические характеристики.
Keywords: antifriction materials, composites, heat storage materials, low-melting materials, plain bearings, wear resistance, thermophysical characteristics.

В настоящее время актуальной задачей является увеличение работоспособности и долговечности узлов трения скольжения шарнирных соединений, особенно по триботехническим показателям. Эта задача может быть решена за счет использования более эффективных антифрикционных композиционных материалов на основе искусственных и растительных полимеров, обладающих такими характеристиками, как износостойкость, минимальным значением коэффициента трения, а также повышенными теплофизическими показателями. При этом для большинства машин эксплуатация шарнирных соединений происходит в жёстких климатических условиях и воздействии динамических нагрузок при относительно малых скоростях скольжения [2,5,6]. Поэтому целью статьи является представление новых антифрикционных композиционных материалов, созданных применительно к подшипникам скольжения шарнирных соединений.

При разработке разрабатываемых антифрикционных материалов было принято рациональным создание композитов на основе использования искусственных и растительных полимеров, таких как полиамид, фторопласты, полиформальдегид, модифицированная древесина и др. Они по сравнению с металлическими вкладышами имеют меньшую плотность, обладают высокой демпфирующей способностью, могут обходится без смазки, а также работать в химически активных средах, в широких диапазонах эксплуатационных температур, нагрузок и скоростей скольжения [1,3,4].

Для достижения требуемых свойств антифрикционных материалов необходимым представляется включение в их структуру модифицирующих компонентов, обладающих

такими свойствами, как антифрикционность, демпфирующая способность, высокая теплопроводность и теплоёмкость.

В качестве таких наполнителей целесообразно применение порошковых материалов, например, меди, бронзы, свинца. Из неорганических наполнителей перспективными являются волокна нити, слюда, глинозем, оксид кремния, а также скрытокристаллический графит, дисульфид молибдена и др. [1,3,4].

От свойств, количества и сочетания модифицирующих наполнителей зависят физико-механические, триботехнические и теплофизические свойства антифрикционных композиционных материалов. При этом такие факторы, как размер, форма наполнителя, их физико-механические и химические свойства существенно влияют на сопротивляемость изнашиванию и фрикционно- износные характеристики создаваемых материалов [1,3].

В таких материалах интегрируются положительные свойства полимеров и металлов, при этом достигаются их повышенные эксплуатационных характеристики [4,5].

Главным недостатком искусственных и растительных полимеров является низкая теплопроводность. Вследствие недостаточного теплоотвода происходит термическая деструкция используемого полимера, приводящая к разрушению функциональных поверхностных слоев [3,4]. Соответственно для повышения работоспособности рассматриваемых материалов, наряду с улучшением триботехнических показателей, должны обеспечиваться и благоприятные тепловые свойства, благодаря чему тепловая энергия должна более эффективно выводиться из зоны фрикционного контактирования. Поэтому необходимым является размещение в объёме материала термоаккумулирующих капсул, заполненных легкоплавким сплавом, помещенным в оболочку, выполненную из более тугоплавкого материала, или размещённого в теле специального конструктивного элемента [3]. Это позволяет повысить интенсивность отвода тепла из функциональных поверхностных слоев за счет расплавления вводимого легкоплавкого материала. Это способствует дополнительному улучшению теплофизических свойств создаваемых антифрикционных материалов, происходящего вследствие теплопоглощения при плавлении используемых легкоплавких материалов. Размещение в основе полимера термоаккумулирующих капсул повышает теплофизические характеристики исследуемого материала [3,4].

В результате создан полимерный композиционный материал, отличающийся содержанием металлической фазы, ее дисперсностью и химическим составом. К оптимизирующим составляющим этих материалов относятся теплопоглощающие, демпфирующие и твёрдосмазочные компоненты, обеспечивающие повышение работоспособности исследуемых материалов.

Предложенный антифрикционный композиционный материал выполнен на основе политетрафторэтилена и наполнителей, включающих дисульфид молибдена, ультрадисперсный порошок скрытокристаллического графита, легкоплавкий материал, заключенный в тонкостенную оболочку, причём компоненты взяты в следующем соотношении их объёмов: политетрафторэтилен 70-75%, дисульфид молибдена 1-3%, скрытокристаллический графит 2-6%, легкоплавкий материал, заключенный в капсулу с тонкостенной оболочкой 15-20%.

При использовании такого материала достигается низкий коэффициент трения, способность к самосмазыванию, задиростойкость, коррозионная стойкость и т.д. Его компоненты не шаржируются в поверхностный слой контртела. Использование дисульфида молибдена и скрытокристаллического графита способствует повышению триботехнических свойств антифрикционного материала и уменьшает потери на трение. Оболочки капсул с легкоплавким материалом также рекомендуется выполнять из металла с высокой теплопроводностью, например, из меди или латуни в форме сферы, эллипсоида или цилиндра

с коническими основаниями и др. При этом она препятствует растеканию расплавленного легкоплавкого материала внутри структуры композита.

В качестве наполнителей могут использоваться чистые металлы – олово, свинец, или сплавы, например, содержащие висмут 35,3%, кадмий 9,5%,свинец 35,1%,олово 20,1% ($T_{пл}$=80°С) или сплав Розе, содержащий висмут 50%,олово 25%,свинец 25% - ($T_{пл}$=90°С), или сплав, содержащий висмут 28,5%,олово 28,5%,свинец 43% -($T_{пл}$=132°С). При этом температура плавления легкоплавкого материала теплопоглащающих элементов зависит от эксплуатационной температуры узла и задавалась в пределах от 80 до 140°С.

Капсулы с легкоплавким материалом рекомендуется располагать в структуре антифрикционного вкладыша, преимущественно в поверхностном слое, прилегающем к функциональной поверхности.

Кроме того, был предложен подшипник скольжения из антифрикционного композиционного материала на основе модифицированной древесины, состоящий из наружной и внутренней металлических втулок, и промежуточного вкладыша, состоящего из чередующихся теплоотводящих древесно- металлических и демпфирующих полимерных элементов.

При этом демпфирующие элементы выполнялись из проклеенных листов древесного шпона, а теплоотводящие представляли собой армирующую конструкцию, расположенную между слоями шпона. Теплоотводящие элементы размещались в предварительно выполненных сквозных отверстиях нечётных слоев шпона, а общее количество соединяемых слоёв, образующих вкладыш, задавалось нечётным. Поперечное сечение предложенного подшипника скольжения представлена на рисунке 1.

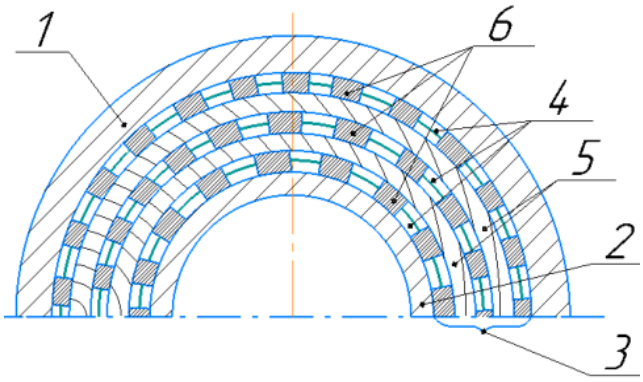


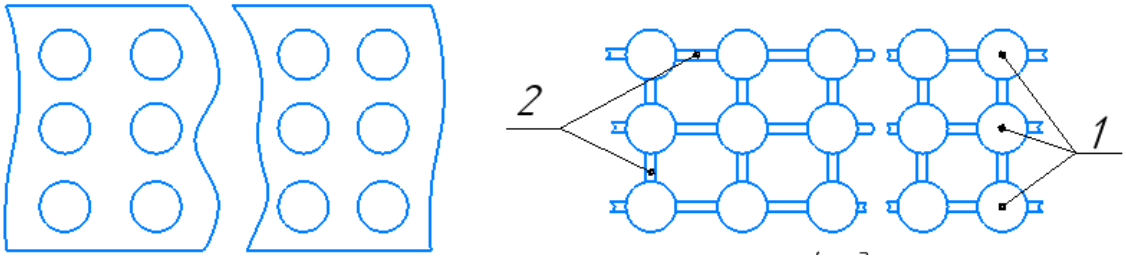
Рис. 1. Поперечное сечение подшипника скольжения: *1*- наружняя втулка; *2* – внутренняя втулка; *3* – вкладыш; *4* – древесно-металлические нечётные слои; *5* – чётные слои из дерева; *6* – теплоотводящие армирующие элементы.

Нечётные составляющие элементы вкладыша подшипника скольжения состоят из шпона с заранее выполненными отверстиями (рис. 2а), в которых устанавливались теплоотводящие элементы в виде армирующей сетки. Чётные слои изготавливались из древесного шпона сплошным (рис. 2 б).

Перед сборкой вкладыша древесный шпон как четных, так и нечётных слоёв подвергается модифицирующей обработке, например, методом пластифицирования и прессования. При этом на контактные поверхности каждого размещённого слоя шпона наносилась клеевая масса и выполнялось промежуточное обжатие с помощью специальной оправки.

После формирования композитного вкладыша устанавливалась внутренняя металлическая втулка, которая затем развальцовывалась, окончательно сжимая композитный

вкладыш. При этом в процессе деформации внутренней втулки формировался требуемый посадочный размер подшипника скольжения и создавалась благоприятная шероховатость его рабочей поверхности.



а б

Рис. 2. Развёртки нечетных *(а)* слоёв, армирующей сетки *(б)*: *1*- теплоотводящие элементы; *2* – соединительные полоски.

Благодаря использованию такой конструкции обеспечивается износостойкость подшипника и снижение коэффициента трения, а также увеличивается теплоотводящая и демпфирующая способность материала вкладыша.

При создании новых антифрикционных композиционных материалов был положен принцип обеспечения совокупностей важных функциональных свойств, таких как повышенные теплоотводящие и теплоаккумулирующие показатели, высокая демпфирующая способность и износостойкость, применительно к условиям функционирования деталей подшипниковых соединений.

Таким образом для создания новых атнифрикционных композиционных материалов необходимо рациональное применение существующих структурных компонентов, позволяющих в существенной степени обеспечить достижение повышенных физико-механических, триботехнических и теплофизических характеристик. При этом использование различных термоаккумулирующих и теплоотводящих элементов, позволяют оптимизировать температурный режим работы узлов скольжения и открывают более широкие перспективы их использования.

Библиографический список

1. **Машков, Ю.К.** Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков **/** М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», – 2004. – 262 с.

2. **Памфилов, Е.А.** Возможности и перспективные пути повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина // Лесн. журн. 2013. № 5. С. 129 –141. (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Новые антифрикционные материалы на основе модифицированной древесины / Е.А. Памфилов [и др.] // Материаловедение. – 2009. – № 4. С. 36 –39.

4. **Памфилов, Е.А.** Создание новых композиционных древесно-металлических материалов / Е.А. Памфилов, Е.В. Шевелева, Д.И. Муратов // Лесн. журн. – 2006. – № 2. С. 60–66. (Изв. высш. учеб. заведений).

5. **Пошарников, Ф.В.** Применение композиционного материала на основе полимера в узлах трения деревообрабатывающего оборудования / Ф.В. Пошарников, А.В. Усиков, А.И. Серебрянский // Лесн. журн. – 2012. – № 4. С. 104–111.

6. **Пошарников, Ф.В.** Особенности работы узлов трения в лесопромышленном оборудовании / Ф.В. Пошарников // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение. Межвузовский сборник научных трудов. «ВГЛТА», – 2009. – Вып. 4. С. 95-100.

УДК 621.7 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_345

С.В. Панин, д-р техн. наук, **А.В. Бяков,** канд. техн. наук, **В.О. Алексенко** (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН)

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПЭЭК С ПОМОЩЬЮ СТАНКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ

Аннотация. *Применение ультразвуковых (УЗ) колебаний является одним из наиболее распространенных методов сварки термопластов. Высокочастотные низкоамплитудные механические колебания используются для осуществления фрикционного нагрева контактирующих поверхностей, что приводит к их локальному (в зоне контакта) плавлению и последующему образованию неразъемного соединения. Ультразвуковая сварка позволяет соединять как аморфные, так и полукристаллические термопластичные полимерные материалы без дополнительного внешнего нагрева. Целью исследования было изучить возможность изготовления высокопрочных неразъемных соединений слоев термопластичных материалов (в данном случае высокопрочного полиэфирэфиркетона - PEEK) и ткани из углеродного волокна с использованием машины для ультразвуковой сварки полимеров. Показано, что при ультразвуковой сварке двух пластин PEEK без использования энергетического регулятора невозможно сформировать высокопрочное соединение внахлест. Использование более тонкого слоя препрега PEEK-Carbon также не позволяет сформировать высокопрочное соединение с высоким значением прочности на сдвиг внахлест (LSS). Причиной этого является низкая массовая доля связующего в препреге (всего 34 %). Формирование многослойного композита PEEK-CF-PEEK возможно при условии, что в качестве центрального слоя используется препрег, а между ним и (внешними) слоями размещены управляющие энергией PEEK в виде пленки PEEK толщиной 250 мкм. Во время испытания на растяжение разрушение произошло вдоль основного материала, но не вдоль соединения внахлестку.*

The application of ultrasonic (US) vibrations is one of the most common methods for welding thermoplastics. High-frequency low-amplitude mechanical vibrations are used to implement frictional heating of the contacting surfaces, which leads to their local (in the contact area) melting and subsequent formation of a permanent joint. Ultrasonic welding allows one to join both amorphous and semi-crystalline thermoplastic polymer materials without additional external heating. The aim of the study was to investigate the possibility of fabricating high-strength permanent joints of layers of thermoplastic materials (in this case, high-strength polyetheretherketone - PEEK) and carbon fiber fabric using a machine for ultrasonic welding of polymers. It is shown that when ultrasonic welding of two PEEK plates without the use of the Energy Director, it is not possible to form a high strength lap joint. The use of a PEEK-Carbon Finer prepreg layer also does not allow to form a high strength joint with a high Lap Shear Strength (LSS) value. The reason for this is the low weight fraction of the binder in the prepreg (just 34%). The formation of a multilayer PEEK-CF-PEEK composite is possible provided that a prepreg is used as a central layer and PEEK energy directors are placed between it and the (outer) layers in the form of a PEEK film with a thickness of 250 μm. During the tensile test, fracture occurred along the base material but not along the lap joint.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, прочность на сдвиг внахлест, ткань из углеродного волокна, PEEK, препрег, директор по энергетике
Key words: ultrasonic welding, lap shear strength, carbon fiber fabric, PEEK, prepreg, energy director

Приложение ультразвуковых (УЗ) колебаний является одним из наиболее распространенных способов сварки термопластов. Высокочастотные низкоамплитудные механические колебания используются для реализации фрикционного нагрева

контактирующих поверхностей, что приводит к их локальному (в области контакта) подплавлению и последующему формированию неразъемного соединения. Ультразвуковая сварка позволяет соединять как аморфные, так и полукристаллические термопластичные полимерные материалы без дополнительного внешнего нагрева [1-4].

Преимуществом данного метода также являются относительно высокая скорость процесса формирования соединения, поскольку процессы сварки успевают протекать за несколько тысяч колебательных циклов (за времена от долей до нескольких секунд), а также лёгкость автоматизации при серийном производстве. Рабочие частоты промышленных технологических ультразвуковых установок варьируются от 10 до 75 кГц; однако полоса 20+/-4 кГц является наиболее распространённым диапазоном рабочих частот при амплитуде колебательного смещения рабочих поверхностей оснастки в интервале от 0,1 до 100 мкм.

В последнее время в научно-технической литературе активно обсуждаются аспекты формирования слоистых композитов на основе термопластов с использованием оборудования для УЗ-сварки. Актуальность данного подхода обусловлена возможностью формирования протяженных изделий путем последовательных УЗ-ассистированного воздействия на соединяемые слои (детали). При этом показано, что эффективным подходом к УЗ-консолидации слоев термопластов является применение промежуточных (расходуемых) пленок (так называемых Energy Director - ED). В процессе УЗ-воздействия происходит их плавление и формируется плотный слой, соединяющий стыкуемые пластины, как правило, одноименных материалов. Для изготовления ED помимо пленок из тех же материалов, что и соединяемые пластины, используются более легкоплавкие материалы. Также варьируют их толщину, пористость, дополнительно вводят армирующие частицы и волокна и др. Одним из наиболее результативных исследователей в данной области является Irene Fernandez Villegas [5].

Аспект введения промежуточных (расходуемых) пленок (Energy Director) для формирования межфазной связи между свариваемыми материалами активно исследуется в литературе [6]. Поскольку основой формирование неразъемного соединения является фрикционный нагрев поверхностей соединяемых слоев, размещение там более быстро расплавляемого материала позволит сохранить в исходном состоянии основной материал, в то время как Energy Director фактически реализует процесс пайки. В случае длительного нагрева соединяемых слоев переходный слой между ними может обретать крайне неоднородную толщину, деградировать, неоднородно проникать в свариваемые поверхности и пр.

Однако помимо соединения пластин одноименных термопластов, применение УЗ-колебаний может быть способом формирования слоистых композитов, содержащих слои армирующих тканей. В настоящее время подобные слоистых композиты на основе термопластических связующих изготавливают преимущественно горячим прессованием последовательно уложенных слоев полимера (в том числе пленок) и ткани [Polymers – Космачев 7]. Однако использование препрега (армирующей ткани в связующем) может позволить формировать слоистые композиты и с помощью УЗ-технологий. Данный вопрос в настоящее время достаточно мало изучен в научно-технической литературе.

Целью работы является исследование возможности получения высокопрочных неразъемных соединений слоев термопластических материалов (в данном случае высокопрочного полиэфирэфиркетона – ПЭЭК) и ткани из углеродных волокон с использованием станка для ультразвуковой сварки полимеров.

Материал и методика исследований

В работе изготавливали пластины из ПЭЭК с целью их последующего соединения с помощью станка для УЗ-сварки. Пластины формировали из порошка ПЭЭК фирмы Victrex (PEEK 450 PF) методом горячего прессования на термогидравлическом прессе GOTECH GT-7014-A (Тайвань). Горячее прессование проводили при температуре T=400°C и давлении P=4 МПа. Размер пластин составлял 90×20×2 мм. Площадь соприкосновения соединяемых пластин составляла 20×20 мм. Для УЗ-соединения пластин использовали станок

ультразвуковой сварки УЗПС-7 (ООО «СпецмашСоник», г. Воронеж). Свариваемые пластины помещали в фиксирующую струбцину, исключающую возможность их взаимного перемещения в процессе приложения УЗ-колебаний. Время приложения УЗ-колебаний для образцов всех типов было идентично, и составляло 1 сек. Усилие прижима также было одинаковым.

Оценку прочности на сдвиг соединенных внахлест пластин проводили согласно ASTM D5868 (ГОСТ Р 57066). Испытания проводили на разрывной электро-механической машине Instron 5582. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 1 мм/мин. Для расчета прочности сдвига соединения внахлёст (Lap Shear Strength) использовали выражение:

$$LSS = \frac{P}{F} \tag{1}$$

где P – разрушающая нагрузка, Н;

F – площадь контакта УЗ-сваренных пластин, м^2.

В работе последовательно изменяли условия формирования слоистого композита (рис. 1).

1) Образец №1 состоял их двух пластин ПЭЭК, соединенные внахлест; при этом между ними слой Energy Director не помещали (реперная точка, рис. 1,а);

2) Образец №2 отличался от образца №1 тем, что между пластинами ПЭЭК был размещен препрег на основе ПЭЭК и ткани из углеродных волокон (УВ) (Toray Cetex TC1200 толщиной 140 мкм, рис. 1,б);

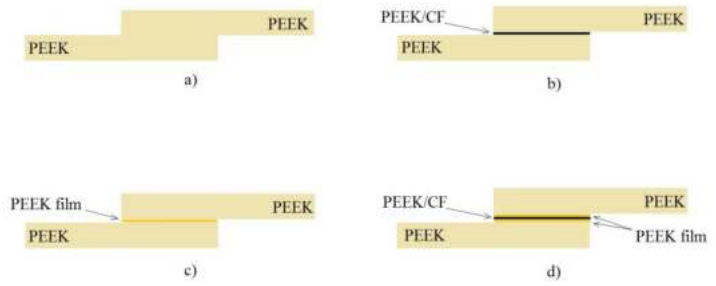


Рис. 1. Схематическое изображение процесса укладки:
a) PEEK – PEEK; *b)* PEEK – prepreg PEEK/CF – PEEK; *c)* PEEK – PEEK film – PEEK; *d)* PEEK – PEEK film – prepreg PEEK/CF – PEEK film – PEEK

3) Образец №3: отличался от предыдущего тем, что в качестве Energy Director между слоями ПЭЭК была размещена пленка ПЭЭК (Victrex, Aptiv 2000 толщиной 250 мкм, рис. 1, в);

4) Образец №4; отличался от предыдущих тем, что содержал 5 слоев, а именно два внешних слоя ПЭЭК, центральный слой из ПЭЭК-препрега с углетканью (идентичный образцу №2), а также два промежуточных слоя (Energy Director) в виде пленки ПЭЭК (идентичные образцу №3, рис. 1,г).

Для наблюдения поверхностей разрушенных образцов использовали оптический микроскоп Neophot 2 (Carl Zeiss, Германия).

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведены диаграммы растяжения чистого ПЭЭК (образец в форме прямоугольной пластины, не содержащей соединение внахлест – реперная точка), а также сварных соединений композитов ПЭЭК (образцы 2-5). Из рисунка видно, что образцы УЗ-соединенных внахлест соединений ПЭЭК-ПЭЭК (№2), а также соединения, полученные с использованием Energy Directors в виде пленок ПЭЭК (№3) и препрега ПЭЭК/УВ (№2) разрушаются при невысоких уровнях приложенных нагрузок: 1000 – 1200 Н. УЗ-соединение пластин внахлест, сформированное при одновременном использовании пленок ПЭЭК и центрального слоя из препрега ПЭЭК/УВ, разрушилось при нагрузке 2600 Н (рис. 2, кривая 5),

что лишь на 28% ниже, чем для исходного ПЭЭК (без соединения внахлест). На кривой 5 видны выраженные участки снижения деформирующего напряжения. Это свидетельствует о локальном нарушении сплошности соединения внахлест, что, однако, не приводит к его разрушению.

На рисунке 3 приведены значения прочности сдвига соединения внахлёст LSS, рассчитанные на основании диаграмм на рис. 2. Видно, что наибольшим значением данного параметра обладает образец №4 (пятислойный композит, содержащий промежуточные пленки ПЭЭК и препрега ПЭЭК/УВ).

Для более детальной интерпретации полученных результатов проведен анализ фотографии поверхностей излома соединения внахлест (рисунок 4). Видно, что при УЗ-соединении образцов PEEK – PEEK (образец №1, рисунок 4, a) и PEEK – PEEK/CF – PEEK (образец 2, рисунок 4, b) соединении формировалось преимущественно по границе контакта соединяемых ПЭЭК-пластин. В результате площадь реального контакта была достаточно низкой.

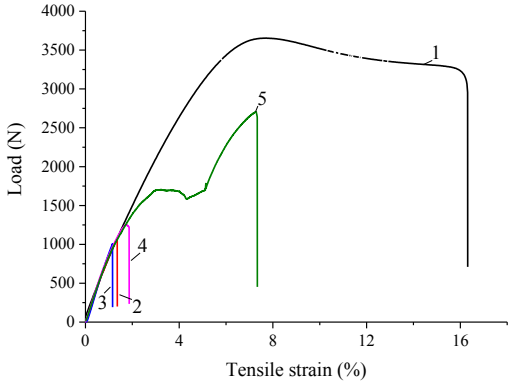


Рис. 2. Load - tensile strain diagrams for neat PEEK *(1)*, as well as the PEEK – PEEK *(2)*; PEEK – prepreg PEEK/CF – PEEK *(3)*; PEEK – PEEK film – PEEK *(4)*; PEEK – PEEK film – prepreg PEEK/CF – PEEK film – PEEK *(5)*

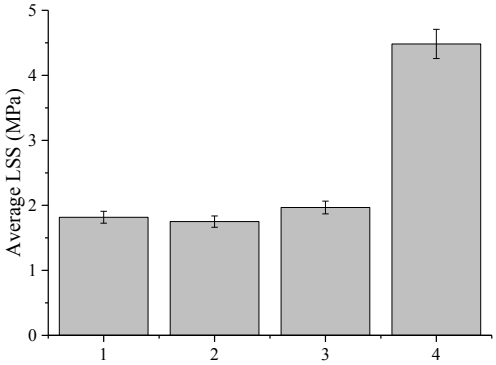
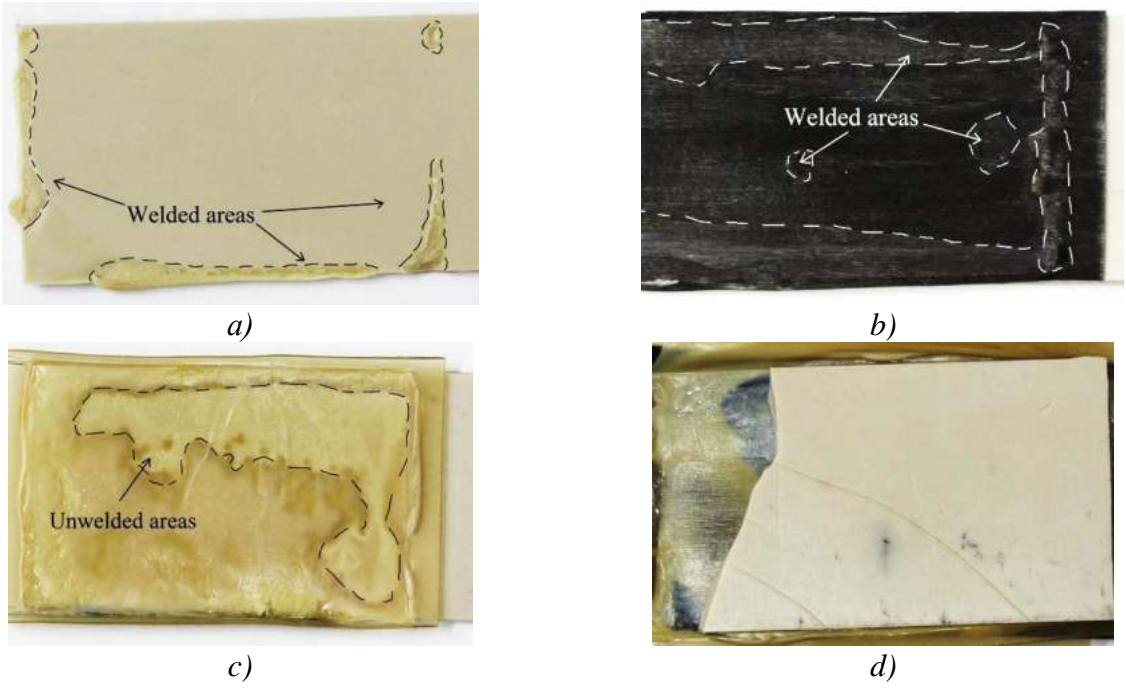


Рис. 3. LSS values of the reference and welded samples with corresponding standard deviation: PEEK – PEEK *(1)*; PEEK – prepreg PEEK/CF – PEEK *(2)*; PEEK – PEEK film – PEEK *(3)*; PEEK – PEEK film – prepreg PEEK/CF – PEEK film – PEEK *(4)*

При ультразвуковой сварке в режиме введения одного Energy Director (одной пленки PEEK. А именно PEEK – PEEK film – PEEK, рисунок 4, c), не УЗ-сваренная область имела достаточно небольшую площадь. Наибольшая сдвиговая прочность соответствовала наиболее полному соединению в композите PEEK – PEEK film – PEEK/CF – PEEK film – PEEK (образец 4, рисунок 4, d). Фактически разрушение произошло по основному материалу, а не соединению встык.

Проведем краткое обсуждение полученных результатов. Для образца №1 отсутствие Energy Director при использованных параметрах УЗ-сварки не позволило в должной степени расплавить поверхности сопрягаемых пластин. В результате контакт сформировался лишь на их краях, обусловив крайне низкую сдвиговую прочность соединения внахлест. В образце №2 в качестве Energy Director выступал слой препрега, в котором массовая доля связующего составляет лишь 34%. В результате УЗ-воздействия м произошло его локальное подплавление. Однако площадь соединения снова оказалась крайне мала, а величина LSS не превысила 2 МПа. В образце №3 использование пленки ПЭЭК, фактически было идентично введению Energy Director. В процессе приложения УЗ-колебаний произошло его частичное расплавление, позволившее увеличить площадь фактического контакта и, соответственно, величину LSS. Наконец, в образце №4 пленки ПЭЭК в полной мере выполнили роль Energy Director, обеспечив формирование надежного пятислойного композита, обладающего высокими показателями прочность на сдвиг.



a) *b)*

c) *d)*

Рис. 4. Фотографии поверхностей излома: PEEK – PEEK *(a)*; PEEK – prepreg PEEK/CF – PEEK *(b)*; PEEK – PEEK film – PEEK *(c)*; PEEK – PEEK film – prepreg PEEK/CF – PEEK film – PEEK *(d)*

В литературе активно исследуются различные материалы для использования в качестве Energy Director. Показано, что, например, повышение пористости позволяет облегчить плавление и повысить межслоевую прочность на сдвиг [5]. С другой стороны, введение в качестве среднего слоя (армированного) препрега, меняет условия формирования соединения внахлест. Авторы связывают это с недостатком материала связующего. В результате прочность на разрыв снижалась [8]. Решением данной проблемы может служить введение между слоем термопласта и слоем препрега тонкого Energy Director (как это было реализовано в данной работе).

Заключение

Показано, что при УЗ-сварке двух пластин ПЭЭК без использования Energy Director не удается сформировать прочное соединение внахлест. Использование слоя препрега ПЭЭК-УВ также не позволяет сформировать надежное соединение, обладающие высоким значением LSS. Причиной этого является невысокая массовая доля связующего в препреге - 34%. Формирование многослойного композита ПЭЭК-УВ-ПЭЭК возможно при условии использования в качестве центрального слоя препрега и размещении между ним и (внешними)

слоями ПЭЭК energy directors в виде пленки ПЭЭК толщиной 250 мкм. В процессе испытаний на растяжение разрушение происходило по основному материалы, а не по соединению внахлест.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00741, https://rscf.ru/project/21-19-00741/».

Библиографический список

1. **Juan, A.** Gallego-Juárez and Karl F. Graff. Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound / A. Juan, / 2015, Pages 295-312.

2. Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices / J. Sackmann [et al.] // Ultrasonics. – 2015. – Vol. 56. – P. 189-200.

3. Micro injection molding processing of UHMWPE using ultrasonic vibration energy / Xavier Sánchez-Sánchez [et al.] // Materials & Design. – 2017. – Vol. 132. – P. 1-12.

4. **Yibo, Suna** A novel ultrasonic precise bonding with non-constant amplitude control / Suna Yibo, Liu Xiaodong, Yang Xinhua // for thermalplastic polymer MEMS // Ultrasonics. – 2018. – Vol. 84. – P. 404-410.

5. A comparative evaluation between flat and traditional energy directors for ultrasonic welding of thermoplastic composites. / I. Fernandez Villegas [et al.] // Proceedings ECCM16 – 16th European conference on composite materials, Seville, Spain, 22-26 June 2014. P. 1-8.

6. Thermal Welding by the Third Phase Between Polymers / Jianhui Qiu [et al.] // A Review for Ultrasonic Weld Technology Developments. Polymers.: 2020, 12, 759; doi:10.3390/polym12040759.

7. Deformation Behavior and Fracture Patterns of Laminated PEEK- and PI-Based Composites with Various Carbon-Fiber Reinforcement. / P.V. Kosmachev, [et al.] / 2021, 13, 2268. https://doi.org/10.3390/polym13142268.

8. Investigation on energy director-less ultrasonic welding of polyetherimide (PEI)- to epoxy-based composites. / E. Tsiangou [et al.] // Composites Part B: Engineering, 2019, 173, 107014. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107014.

УДК 621.89 + 665.7.035 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_350

Н.С. Почес, В.Н. Малышев, д-р техн. наук (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МДО-ПОКРЫТИЙ СФОРМИРОВАННЫХ В СЛАБОЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ С ДОБАВЛЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Аннотация. *Работа посвящена вопросам износостойкости покрытий, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО-покрытий) на алюминиевых сплавах. Для формирования покрытий использовался слабощелочной электролит и его модификации путем введения алюмината натрия, суспензии фторопласта и ее сочетание с углеродными наночастицами. Испытания на трение и изнашивание пары трения «МДО-покрытие - Сталь» по схеме «Кольцо-Кольцо» в смазочном материале показали улучшение триботехнических характеристик МДО-покрытий при добавлении суспензии фторопласта.*

The paper is devoted to the issues of coatings wear resistance formed by the micro-arc oxidation method (MAO-coatings) on aluminum. To form coatings weakly alkaline electrolytes were used. Additionally, electrolytes were modified by sodium aluminate, fluoroplastic suspension (also together with carbon nanoparticles). Tribotests of tribocouple

“MAO-coating - Steel” by scheme “Ring-Ring” in grease presence performed significant enhancing of tribological characteristics of MAO-coatings, by forming in the electrolyte modified by fluoroplastic suspension.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, плазменно-электролитическое оксидирование, триботехнические характеристики, коэффициент трения, МДО-покрытия, ПЭО-покрытия.
Keywords: micro-arc oxidation, plasma electrolytic oxidation, tribotechnical performances, friction coefficient, MAO-coatings, PEO-coatings.

Введение

Разработка и внедрение износоустойчивых покрытий на поверхности деталей – перспективное направление в машиностроении. Поскольку до 80% аварий и отказов в машинах и механизмах связано с износом, а в отдельных отраслях промышленности (например, строительная, нефтегазовая, горнодобывающая и пр.) этот показатель достигает значения до 95%, то создание и применение технологий по формированию износостойких покрытий является актуальной задачей. [1].

Использование методов нанесения износостойких покрытий создает обширные возможности в увеличении работоспособности и долговечности активно изнашивающихся частей. Одним из перспективных методов формирования износоустойчивых слоев является метод микродугового оксидирования (МДО), называемый также как плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО) [2]. Данная технология относительно проста и хорошо отработана на металлах и сплавах вентильной группы (Ti, Mg, Zr, Ta, и особенно Al).

Суть этой технологии заключается в формировании на поверхности изделия, погруженного в электролит, в условиях воздействии микродуговых разрядов, высокопрочного керамикоподобного покрытия, состоящего в основном из окислов материала подложки и соединений, образованных входящими в электролит компонентами. Например, покрытия, формируемые на алюминии и его сплавах, состоят преимущественно из окислов алюминия, в том числе его наиболее прочной фазы – α-Al_2O_3 (корунд).

К основным преимуществам МДО-покрытий относятся их высокие эксплуатационные свойства (износо- и коррозионностойкость, высокие теплозащитные свойства, диэлектрическая прочность), возможность широкого регулирования толщины модифицированного слоя (от нескольких микрон до 300-400 мкм). Немаловажным преимуществом технологии МДО является экологичность процесса, нетоксичность применяемых электролитов, что позволяет минимизировать затраты на их утилизацию.

Вместе с тем, процесс формирования МДО-покрытий, по сравнению с обычным анодированием, имеет относительно высокое энергопотребление, а также некоторые сложности с формированием равномерного покрытия на деталях сложной формы (требуется создание дополнительной оснастки).

Спектр применения МДО-покрытий весьма разнообразен. Микродуговое оксидирование встречается в изделиях машиностроения, в частности нефтяной и газовой промышленности, приборостроения, медицины и пр. [3-4]. При этом, состав используемого электролита оказывает существенное влияние на свойства получаемых МДО-покрытий [5-6].

Разработка смазочных материалов, отвечающих современным вызовам и тенденциям, является одним из приоритетных направлений в машиностроении, поскольку большинство узлов трения машин и механизмов работают в условиях смазки, обеспечивающей снижение трения и изнашивания, причем в некоторых случаях относительное движение двух несущих поверхностей возможно только в присутствии смазочного материала.

Современные тенденции в области экологии (снижение затрат ресурсов, выбросов, ужесточение экологического законодательства и др.) приводит к тому, что разработка современных смазочных материалов привлекает все большее внимание [7-9].

Ранее, в ряде работ [10-12], авторами исследовались триботехнические характеристики МДО-покрытий в современных смазочных материалах, где изложены методики испытаний, их результаты и обсуждение.

Целью данной работы являлось изучение триботехнических характеристик МДО-покрытий, сформированных в электролитах более сложного состава, с добавлением различных компонентов (полимеров, наночастиц и проч.), в смазочных материалах.

Методика испытаний

МДО-покрытия формировались на алюминиевых сплавах Д16 и В95 в слабощелочном электролите. В качестве дополнительных компонентов в электролит добавлялись:

- алюминат натрия ($NaAlO_2$);
- суспензия фторопласта (Ф-4Д);
- суспензия фторопласта и углеродные наночастицы (Ф-4Д + наночастицы).

В качестве смазочных материалов использовались базовые масла на основе диизотридецил адипината (DITA), полиальфаолефина (PAO) и полиэтиленгликоля (PEG).

Испытания на трение и изнашивание проводились схеме трения «кольцо-кольцо» (рис. 1).

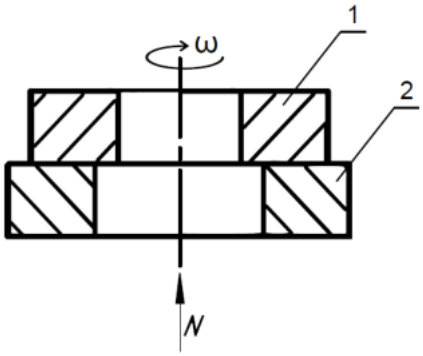


Рис.1. Схема трения «кольцо-кольцо»: *1* – образец с МДО-покрытием; *2* – контртело из стали.

Для испытаний по этой схеме трения верхнее (подвижное) кольцо было выполнено размером Ø28х18х6 мм с МДО-покрытием, а нижнее (неподвижное) с размерами Ø35х22х2,5 мм из стали 100Cr6 (ШХ15) с твердостью HRC66.

Испытания проводились при комнатной температуре, при нагрузке 700 Н. Скорость вращения верхнего образца составляла 750 об/мин, что соответствует скорости скольжения ≈ 1 м/с. Время проведения испытаний 60 минут.

Перед испытанием образцы подвергались чистке в ультразвуковой ванне в изопропаноле и петролейном эфире (по 10 минут на каждый). Затем производилось контрольное взвешивание массы до испытаний. Те же операции выполнялись после испытаний. Непосредственно в процессе испытаний записывалась диаграмма изменения момента трения.

Результаты и обсуждения

На рис. 2 и рис. 3 представлены средние значения коэффициента трения и массового износа образцов с МДО-покрытиями, сформированными в электролите без добавления дополнительных компонентов (исходный электролит).

По результатам испытаний МДО-покрытие на сплаве Д16 в масле DITA демонстрирует наименьший коэффициент трения, а наибольший в масле PEG. Примерно равный коэффициент трения на образцах получен в масле PAO.

Относительно высокий износ отмечается в паре с МДО-покрытием на сплаве В95 в масле DITA, в то время как в масле PAO в этой паре трения зафиксирован прирост массы, а в масле PEG получен наименьший износ покрытия.

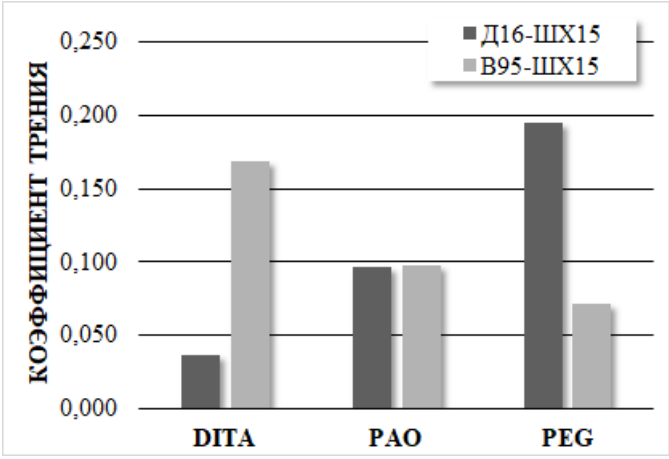


Рис. 2. Средние значения коэффициента трения после испытаний по схеме трения «кольцо-кольцо» покрытий, сформированных в исходном электролите.

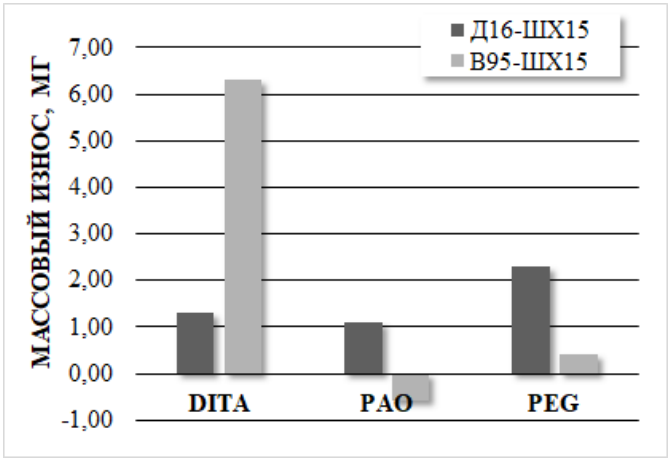


Рис. 3. Средние значения массового износа после испытаний по схеме трения «кольцо-кольцо» покрытий, сформированных в исходном электролите.

На основании поведенных испытаний, для исследования МДО-покрытий, сформированных в модифицированных электролитах, был выбран сплав Д16 и масло PEG.

Результаты испытаний представлены на рис. 4 и рис. 5.

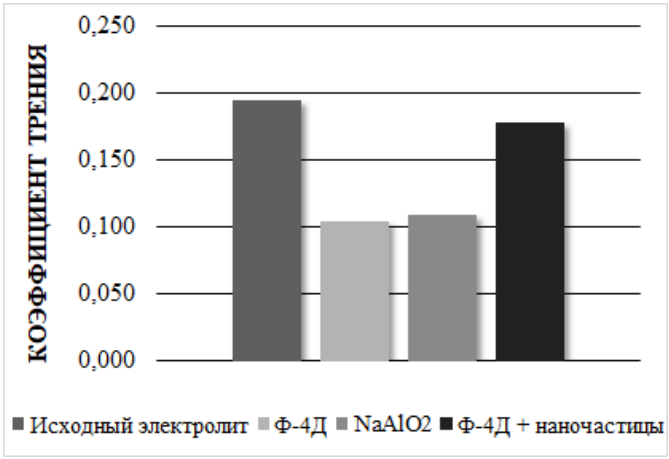


Рис. 4. Средние значения коэффициента трения после испытаний по схеме трения «кольцо-кольцо» в масле PEG покрытий, сформированных в модифицированных и исходном электролитах.

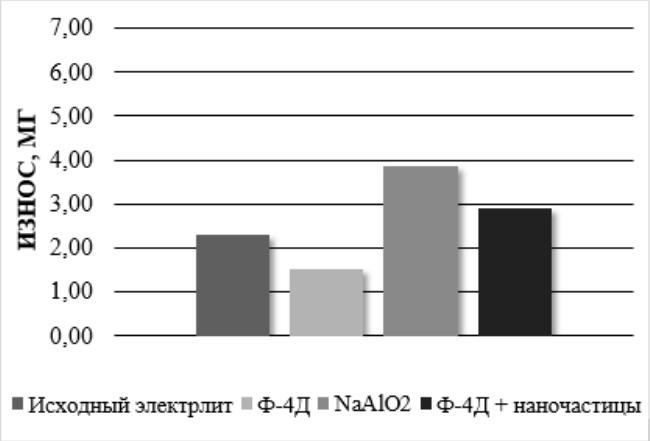


Рис. 5. Средние значения массового износа после испытаний по схеме трения «кольцо-кольцо» в масле PEG покрытий, сформированных в модифицированных и исходном электролитах

Как видно из результатов (Рис.4 и рис.5), добавление в электролит суспензии фторопласта и алюмината натрия влияет на снижение коэффициента трения. Совместное же введение фторопласта и углеродных наночастиц не приводит к улучшению показателей коэффициента трения. МДО-покрытие, сформированное в электролите с добавлением фторопластовой суспензии, имеет износ ниже, чем покрытие, сформированное из исходного электролита. В отношении износа, в случаях добавления в электролит таких компонентов, как алюминат натрия и суспензия фторопласта в сочетании наночастицами, происходит некоторое повышение износа покрытий.

Заключение

В результате испытаний было выявлено что добавление суспензии фторопласта в электролит приводит к существенному снижению коэффициента трения (до 46,7%) и износа (33,0%) соответственно. Добавление же в электролит других компонентов, исследованных в работе, существенных улучшений не оказывает.

Библиографический список

1. **Елагина, О.Ю.** Методы создания износостойких покрытий / О.Ю. Елагина // Учебное пособие. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2010. – 570 с.: ил.

2. **Суминов, И.В.** Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А. Эпельфельд Под общ. ред. И.В. Суминова-М.: Техносфера, т. 2, 2011 512 с.

3. **Малышев, В.Н.** Модифицирование поверхностного слоя деталей методом микродугового оксидирования: состояние, возможности, перспективы / В.Н. Малышев // Управление качеством в нефтегазовом комплексе, 2014, №1, С.15- 20.

4. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов [и др.] – М.: ЭКОМЕТ, 2005. - 368 с.

5. **Famyeh, L.** Plasma Electrolytic oxidation coatings on aluminum alloys: microstructures, properties and applications / L. Famyeh, X. Huang // Modern consepts in material science. 2019. №2(1).

6. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions - A review / Lu X. [et al.] // Surface & coatings technology. 2016, Volume 307, pp.1165-1182.

7. **Фитч, Дж.** Анализ масел. Основы и применение / Дж. Фитч, Д. Тройер // Пер. с англ. 2-го изд.; под ред. Е.А. Новикова, М.В Кирюхина, – СПб.: ЦОП «Профессия», 2015. – 176 с., ил.

8. **Манг, Т.** Смазки. Производство, применение, свойства. / Т. Манг, У. Дрезель // Справочник / пер. с англ. 2-го изд.; под ред. В.М. Школьникова, – СПб.: ЦОП «Профессия», 2015. – 944 с., ил.

9. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю. Евдокимов [и др.] // М.: Нефть и газ: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. 422 с.

10. **Почес, Н.С.** Сравнение триботехнических характеристик МДО-покрытий, сформированных на сплавах Д16 и В95 при испытании в экологических смазочных материалах. / Н.С. Почес, Малышев, N. Dörr // В сборнике: Трибология - машиностроению. Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН, 2018. С. 409-415.

11. Tribological performance of micro-arc oxidation coatings with base oils Tribologie und Schmierungstechnik / Malyshev V.N. [et al.] // 65(5) 5-11, N. S. 2018.

12. Tribological tests of micro-arc oxidation coatings in environmentally safe lubricants / V.N. Malyshev [et al.] // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 862 022066.

УДК 621.373.826:621.78+539.25 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_355

А.В. Сидашов, канд. физ.-мат. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения), **А.Т. Козаков,** д-р физ.-мат. наук (Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета), **С.И. Яресько,** д-р техн. наук (Самарский филиал Московского Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук), **М.Д. Михайловская** (Ростовский государственный университет путей сообщения)

СЕГРЕГАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ

Аннотация. *Представлены результаты исследований поверхностных слоёв сталей Р6М5 и 9ХС, выполненных методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в сочетании с ионным профилированием, после лазерной обработки на воздухе. Установлено, что для сталей Р6М5 и 9ХС наблюдается селективное обогащение поверхности оксидами легирующих элементов вольфрама, хрома, молибдена, ванадия до глубины 220 нм и 55 нм соответственно.*

The results of studies of the surface layers of P6M5 and 9XC steels performed by XPS in combination with ion profiling after laser treatment in air are presented. It is established that for P6M5 and 9XC steels, selective enrichment of the surface with oxides of alloying elements of tungsten, chromium, molybdenum, vanadium to a depth of 220 nm and 55 nm, respectively, is observed.

Ключевые слова: энергия связи, кислородная среда, поверхность, сегрегационные явления.
Keywords: binding energy, oxygen environment, surface, segregation phenomena.

Обработка лазером сталей Р6М5 и 9ХС проводилась на воздухе без оплавления поверхности. Обработка сталей Р6М5 и 9ХС выполнена на импульсной лазерной установке с активным элементом из стекла с Nd. В экспериментах плотность энергии выдерживалась равной 2.7 Дж/мм^2, что обеспечивало получение на поверхности ЗЛВ однородной пленки оксидов. Во всех экспериментах длительность импульса – 10 мс, частота следования импульсов – 1 Гц. Зона обработки равномерно покрывала поверхность образца с коэффициентом перекрытия равным 0,9. При этом схема и условия облучения соответствовали указанным в работах [1, 2].

Химический состав поверхности и приповерхностных слоев образцов сталей Р6М5 и 9ХС выполнен методом РЭС (рентгеноэлектронной спектроскопии) на системе анализа поверхности (SPECS, Германия). В качестве возбуждающего излучения использовалось AlKα – монохроматическое излучение с энергией 1486.6 эВ. Энергетическое разрешение анализатора составляло 0.46 эВ на линии Ag3d3/2. В качестве внешнего стандарта для определения энергий связи была использована линия C1s углерода с энергией 285 эВ. Обусловленный из-за упруго рассеянных электронов фон корректировался с помощью программного обеспечения прибора SPECS. Вакуум при съемке поддерживался на уровне 8*10–10 мбар.

Ионное профилирование образцов осуществлялось в препарационной камере системы анализа поверхности SPECS. Профилирование ионами Ar+ осуществлялось с интервалом 5 минут при ускоряющем напряжении ионной пушки 2.99 кэВ и ток пучка 10 мА, давление аргона в препарационной составляло не более 5*10–5 мбар.

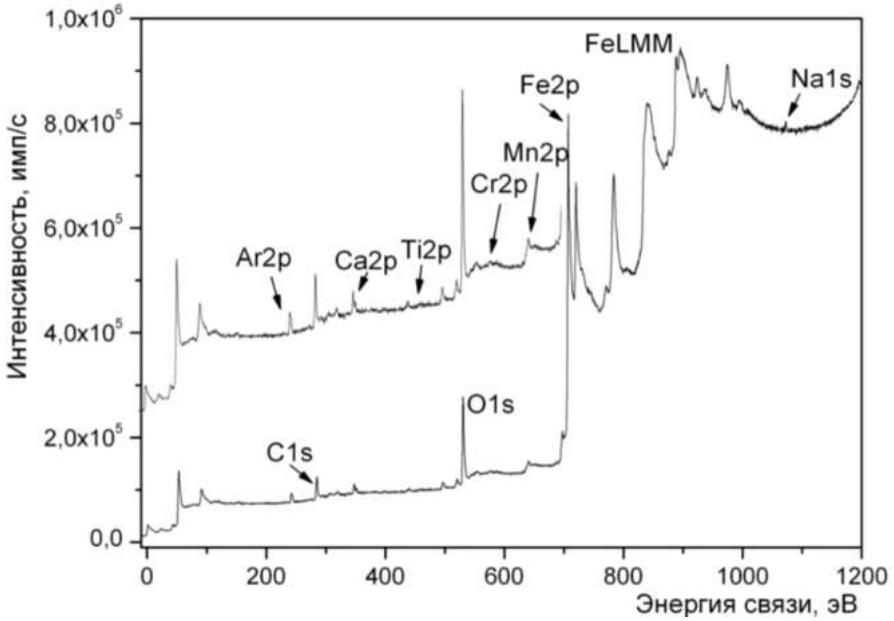


Рис. 1. Обзорный РЭС спектр стали 9ХС

Определенной проблемой в исследовании образцов является то, что их поверхность необходимо исследовать в таком состоянии, какой она получилась после всех процедур, связанных с модификацией и последующей очисткой образца. Исследованы образцы толщиной 1мм с поперечными размерам 10х10 мм. Предполагается, что состав поверхности при подготовке к исследованию методом РЭС не нарушен. Глубина анализа метода РЭС составляет 0,5 – 4 нм [1-3] и поэтому метод РЭС является крайне чувствителен к состоянию поверхности. Поверхность образцов, находящиеся в воздушной среде содержит загрязнения, в их числе углеводородные и гидроксильные группы, а также частично адсорбированный кислород, которые приводят к уменьшению интенсивности и контрастности РЭС спектров. Сильно развитая поверхность за счет её шероховатости также оказывает влияние на РЭС-анализ. На интенсивность электронных линий рассматриваемых образцов оказали влияние оба фактора. Вначале были получены спектры исходной модифицированной поверхности, а затем осуществляли травление поверхности ионами аргона. После этого при достаточно гладкой, но первоначально загрязненной поверхности мы ожидаем повышения интенсивности спектров и их контрастности. Кроме того, ионное профилирование позволяет проследить изменение химического состояния в приповерхностных слоях по глубине. На первом этапе исследования с поверхности образцов записываются спектры в широком диапазоне энергий и по ним выполняют анализ состава поверхности. На рис. 1 и 2 представлены спектры РЭС с поверхности сталей после предварительного профилирования в течение 10 минут.

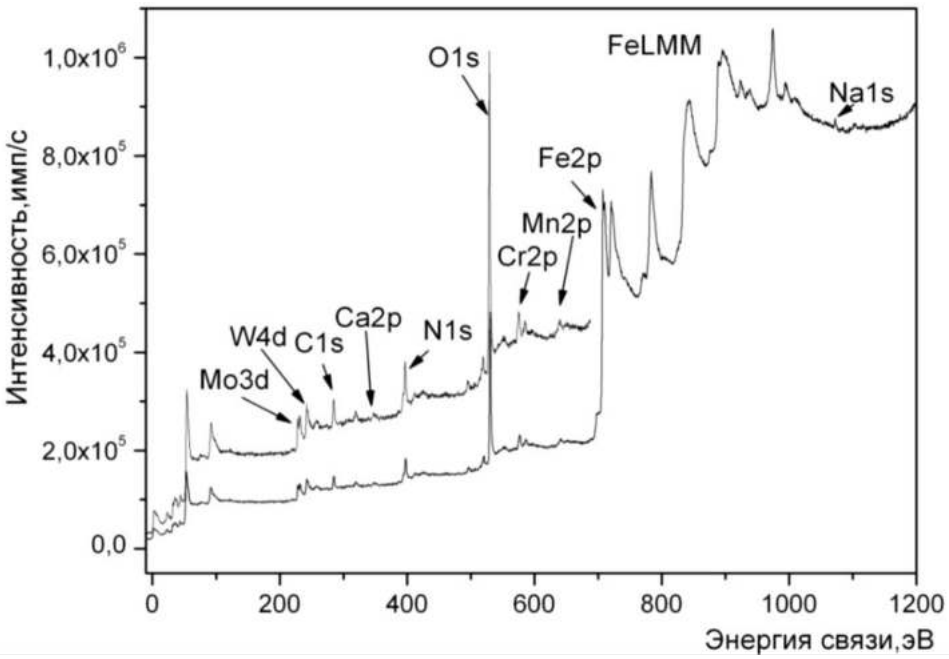


Рис. 2. Обзорный РЭС спектр стали Р6М5

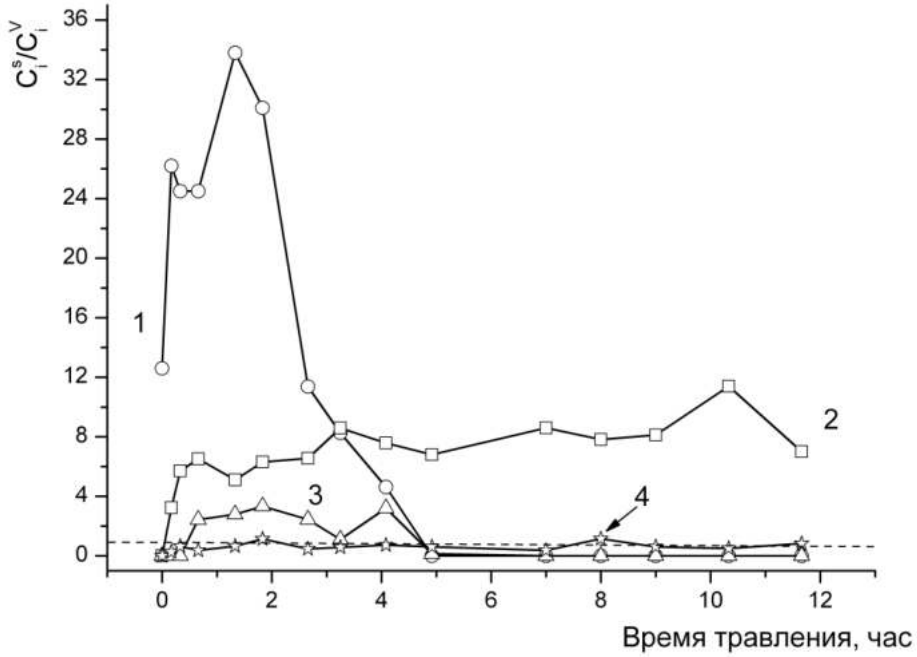


Рис. 3. Сталь 9ХС отношение C_i^S/C_i^V поверхностных концентраций легирующих элементов C_i^S к их объемному содержанию C_i^V для: *1* – титан; *2* – марганец; *3* – молибден; *4* – хром

Для спектров внутренних уровней легирующих элементов Ti2p-, Cr2p-, V2p-, Mn2p-, W4f- и W5d-, Mo3d- и Mo4d-для стали Р6М5 и 9ХС выполнена оценка их химического состояния по глубине образца, что позволило проанализировать их распределение по глубине исследованных слоев. Поверхностный слой стали 9ХС обогащен атомами Ti, Mo и Mn. Зафиксировано, что количество хрома на поверхности меньше, чем его содержание в объеме, последнее означает, что исследованные слои обеднены хромом. Возможно, он содержался в стравленном предварительно поверхностном слое. Молибден обогащает поверхность в течение первых пяти часов травления.

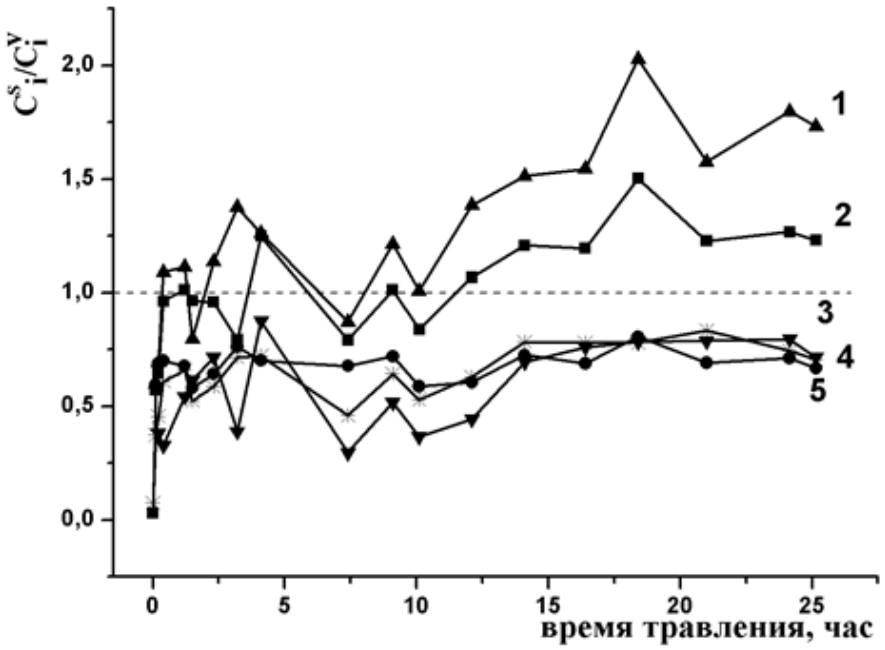


Рис.4. Стали Р6М5 отношение C_i^S/C_i^V поверхностных концентраций легирующих элементов C_i^S к их объемному содержанию C_i^V :
1 – вольфрам; *2* – молибден; *3* – ванадий; *4* – железо; *5* – хром

Содержание атомов хрома как для стали 9ХС, так и для слоя стали Р6М5 на исходной поверхности меньше, чем в объеме. Содержание ванадия в исследованном слое не превышает его содержание в объеме. Содержание вольфрама и молибдена в течение первых 12 часов, что соответствует половине исследованного слоя, на поверхности стали находится на уровне концентрации в объеме. Данные ОЭС [1, 5] для сталей 9ХС и Р6М5 в согласуются с данными РЭС, в частности по обогащению поверхности стали 9ХС молибденом, а стали Р6М5 – молибденом и вольфрамом, а также с тем, что содержание молибдена и вольфрама увеличивается с глубиной травления. Но все-таки следует отметить, что исследуемые по толщине методами оже-электронной и рентгеноэлектронной спектроскопии поверхностные слои были разными. В последнем случае слой оксидов металлов после ЛО был исследован по всей толщине, а в первом – только в начале слоя.

Сравнивая данные для исходной поверхности стали 9ХС (рис. 3) по содержанию хрома и после обработки можно отметить, что лазерная обработка приводит к обогащению содержания хрома на поверхности стали, но не содержание по толщине модифицированного слоя. В течение первых пяти часов поверхность обогащена титаном и марганцем. На рис. 4 приведены данные для стали Р6М5, видно, что поведение легирующих элементов хрома и молибдена после лазерной обработки на воздухе существенно отличается от стали 9ХС. Поверхность стали Р6М5 не обогащена легирующими элементами. После лазерной обработки вольфрам и молибден обогащают поверхность в 2 и 1,5 раза соответственно. Для других легирующих атомов стали – ванадия и хрома не наблюдается повышение концентрационного содержания по сравнению с их содержанием в объеме. Толщина слоя оксидов для стали 9ХС составляет ~ 55 нм, а для стали Р6М5 ~ 220 нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (протокол от 09.02.2021 г. № АИ-6).

Библиографический список

1. **Козаков, А.Т.** Модификация и анализ поверхности сталей и сплавов / А.Т. Козаков, С.И. Яресько, А.В. Сидашов // ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – 378 с.
2. Особенности модификации поверхности инструментальных сталей лазерным излучением / А.В.Сидашов [и др.] // Трение и износ. - 2020. Т. 41, № 6. - С. 738-744
3. **Сидашов, А.В.** Применение метода РФЭС для изучения особенности строения, химической связи и состава границы раздела оксид-металл бинарного сплава нихром / А.В. Сидашов, А.Т. Козаков, М.В. Бойко // Изв. РАН. Сер. Физ. – 2014. Т.78, № 4. – С. 385-397
4. **Sidashov, A.V.** Nonequilibrium processes of segregation and diffusion in metal-polymer tribosystems / A.V. Sidashov, I.V. Kolesnikov // AIP Conference Proceedings. - 2017. Vol. 1915. DOI: 10.1063/1.5017319

Sidashov, A.V. Auger and X-ray photoelectron spectroscopy study of the tribocontact surface after laser modification / A.V. Sidashov, A.T. Kozakov, S.I. Yaresko // Mater. Sci. Forum. - 2016. Vol. 870, pages 298-302. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.298

УДК 691.175.2 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_359

Р.Е. Христофорова, Н.Н. Лазарева, канд. техн. наук, **А.П. Васильев,** канд. техн. наук, (Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова)

РАЗРАБОТКА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОДНОСТЕННЫМИ УНТ И КАОЛИНОМ

Аннотация. *Необходимость испытаний антифрикционных покрытий при пониженных нагрузках требует создания более чувствительного оборудования. Поэтому нами разработан стенд для испытаний на трение и износ в соответствии со стандартом ASTM G99 Триботест-02, который является настольной версией предыдущей модели. Технические характеристики стенда приведены в таблице 2. Благодаря компактному настольному исполнению стенд может быть установлен в любой лаборатории, где есть необходимость производить трибологические испытания. К образцам для испытаний не предъявляются специальные требования, поэтому можно проводить экспресс-тесты сразу при нанесении покрытий.*

The paper presents the results of physical, mechanical and tribotechnical characteristics, IKS, SEM, DSC of polymer composites based on polytetrafluoroethylene with fillers. It is shown that the introduction of complex fillers significantly increases the abrasive resistance of composites, for example, for a composite containing CNTs up to 2 wt%, the abrasive resistance increased by up to 221 times as compared to the initial PTFE.

Ключевые слова: композиты, политетрафторэтилен, углеродные нанотрубки, каолин, ультразвук, износостойкость, коэффициент трения, степень кристалличности.
Keywords: composites, polytetrafluoroethylene, carbon nanotubes, kaolin, ultrasound, wear resistance, coefficient of friction, degree of crystallinity.

Введение

В настоящее время для применения в триботехнике разрабатывают полимерные композиционные материалы из политетрафторэтилена (ПТФЭ) с использованием различных наполнителей. Перспектива применения ПТФЭ обусловлена наличием у него уникальных свойств: уникальная химическая инертность, высокая термическая стойкость,

морозостойкость, хорошие диэлектрические свойства и низкий коэффициент трения. Однако наряду с этим ПТФЭ обладает и рядом отрицательных качеств, таких как сравнительно низкая износостойкость, высокий коэффициент линейного термического расширения и хладотекучесть [1].

Для разработки износостойких полимерных композиционных материалов ПТФЭ модифицируют различными наполнителями, что позволяет широко применять ПТФЭ в узлах трения машин и оборудования.

Цель работы – исследования влияния совместного внедрения наполнителей (УНТ + каолин) на физико-механические и триботехнические свойства и структуру ПТФЭ.

Объекты и методы исследований

В качестве полимерной матрицы использовали ПТФЭ марки Ф-4 ПН-90 (ГОСТ-10007-80) «ОАО ГалоПолимер», производства Россия. В качестве наполнителей использовали одностенные углеродные нанотрубки марки Tuball modified onewall CNT (ООО «ПХТ», Россия) и каолинит Владимирского месторождения Донецкой области (Украина).

Подготовка ПТФЭ заключается в просушке в печи при температуре 180 °С в течение 4 ч. Каолин сушили в печи при температуре 120 °С в течение 4 часов. Просушенный каолин подвергали механоактивации в планетарной мельнице «Активатор – 2S» (ООО «Активатор», Россия) в течение 2 минут. УНТ подвергали воздействию ультразвуковых колебаний на УЗ генераторе «И-10» (ООО «Ультразвуковая техника — ИНЛАБ», Россия) в жидкой среде в течении 5 минут. Композиты получали путем жидкого смешения полимера с наполнителями, используя технологию холодного формования и дальнейшим свободным спеканием до 375 ℃.

Результаты исследований и их обсуждение

В данной работе исследовали влияние наполнителей (УНТ и каолин), введённых в композит ПТФЭ.

На рис. 1-2 представлены результаты физико-механических характеристик композитов в зависимости от степени наполнения УНТ.

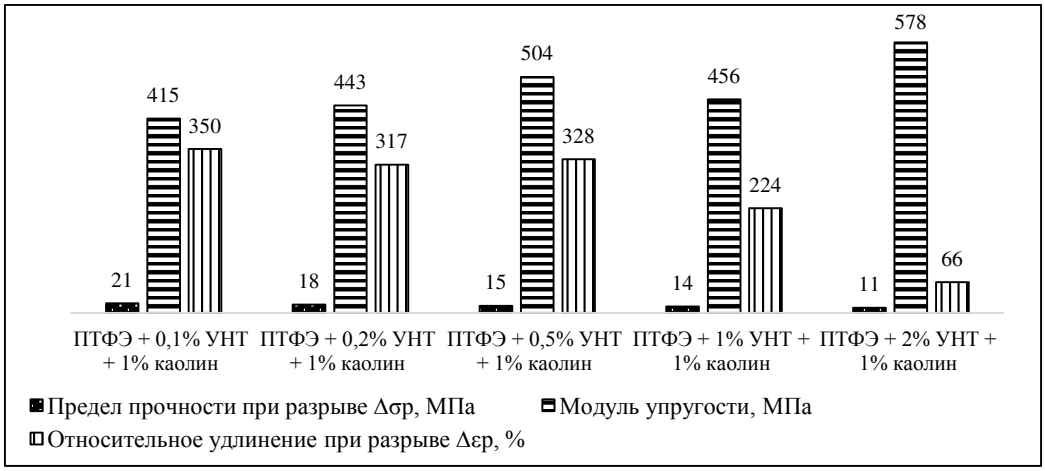


Рис. 1. Физико-механические характеристики композитов

Анализ результатов физико-механических испытаний показывает, что с увеличением содержания наполнителя показатель модуля упругости повышается, в то время как показатели предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве постепенно снижаются. Это связано с тем, что с увеличением содержания УНТ повышается твердость материала с одновременным снижением эластичности. Ухудшение свойств при превышении оптимальной концентрации УНТ (0,5 мас. %) объясняется повышением жесткости молекул, взаимодействующих с наполнителем в пределах аморфной фазы, следовательно, повышением хрупкости и снижением прочности [2].

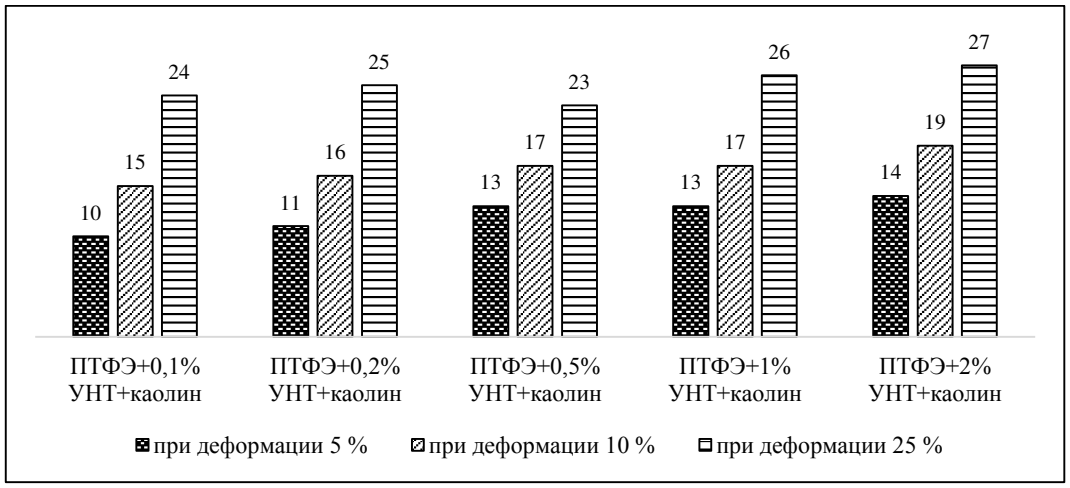


Рис. 2. Результаты предела прочности при сжатии

Результаты испытаний композитов на прочность при сжатии (см. рис. 2) показывают, что введение наполнителей в целом положительно влияет на повышение прочности композитов.

На рис. 3 приведены результаты триботехнических характеристик композитов в зависимости от степени наполнения УНТ. Результаты триботехнических испытаний исходного ПТФЭ составляют: I ~ 2,4 мг/ч, f = 0,20.

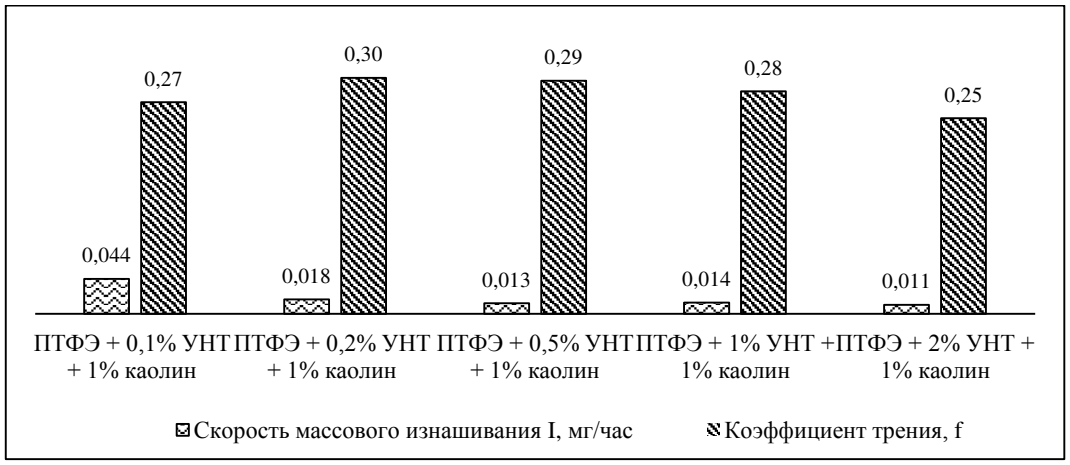


Рис. 3. Триботехнические характеристики композитов

Анализ результатов триботехнических испытаний показывает, что с увеличением концентрации УНТ скорость массового изнашивания уменьшается, т.е. происходит повышение износостойкости композитов. Износостойкость повышается 55-221 раз по сравнению с исходным ПТФЭ. Введение комплексных наполнителей в ПТФЭ приводит к некоторому повышению значения коэффициента трения ПКМ (~ на 39%) по сравнению с исходным ПТФЭ.

Для объяснения триботехнических свойств композитов при введении наполнителей проведены исследования поверхностей трения на сканирующем электронном микроскопе.

На рис. 4 приведены микрофотографии поверхности трения композитов в зависимости от степени наполнения УНТ.

Анализ результатов микроскопических исследований показывает, что с увеличением содержания УНТ происходит увеличение размеров «чешуйчатых» образований. Данное явление может объяснить повышение износостойкости композитов при увеличении содержания наполнителей. Как видно из рис. 3 поверхностный слой ПКМ шероховатый, наблюдаются «чешуйчатообразные» микровыступы количество которых при увеличении содержания УНТ уменьшается, но при этом высота границ «чешуек» повышается.

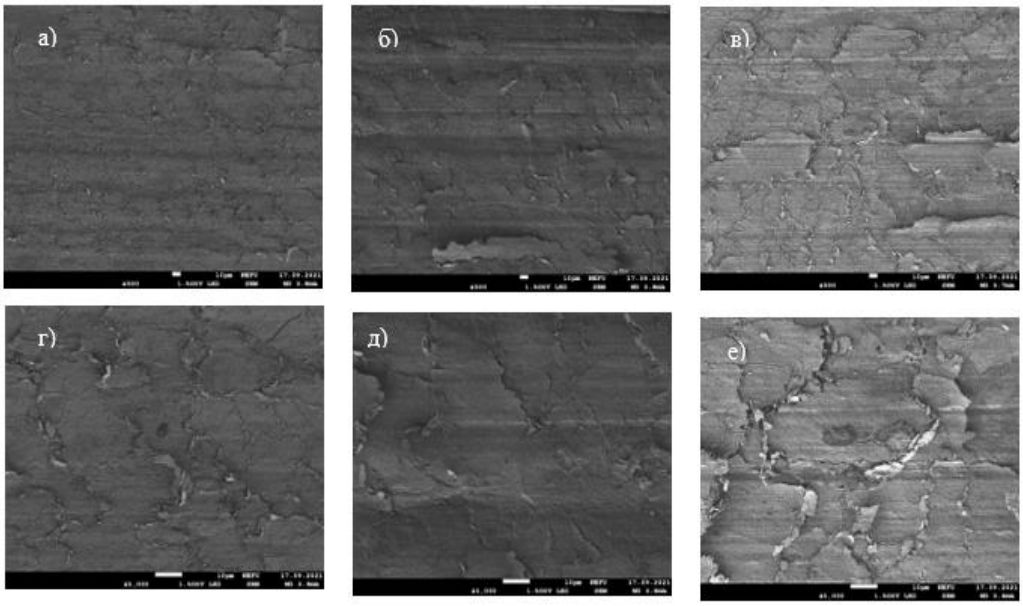


Рис. 4. Микрофотографии поверхности трения ПКМ: при увеличении ×300 раз:
а) ПТФЭ + 0,1 % масс. УНТ +1 % каолин; *б)* ПТФЭ + 0,5 % масс. УНТ +1 % каолин;
в) ПТФЭ + 1 % масс. УНТ +1 % каолин;
при увеличении ×1000 раз: *г)* ПТФЭ + 0,1 % масс. УНТ +1 % каолин;
д) ПТФЭ + 0,5 % масс. УНТ +1 % каолин;
е) ПТФЭ + 1 % масс. УНТ +1 % каолин

Для подтверждения полученных результатов поверхности трения композитов проводили исследования методом ИК-спектроскопии. На рис. 5-6 представлены ИК-спектры поглощения композитов до и после трения в зависимости от степени наполнения УНТ и каолином. Известно, что ИК-спектр ненаполненного ПТФЭ является сравнительно простым по сравнению с другими термопластами и объясняется химической структурой макромолекул полимера, где интенсивные полосы поглощения относятся к валентным колебаниям групп — CF_2 (1211 и 1145 $см^{-1}$), которые сохраняются после трения.

Анализ результатов ИК-спектров поглощения до трения показывает: наиболее интенсивные полосы относятся к валентным колебаниям групп CF_2 (1211 и 1154 $см^{-1}$) и колебанию ν(CC), проявляющемуся в виде перегиба при ~1233 $см^{-1}$. В области ниже 650 $см^{-1}$ располагаются деформационные и внеплоскостные колебания групп CF_2 [3].

Анализ результатов ИК-спектров поглощения после трения показывает, что в области от 3400 до 3200 $см^{-1}$ видно увеличение количества фрагментов, содержащих гидроксильные группы. С увеличением содержания наполнителей количество данных фрагментов увеличивается. В области 1680-1400 $см^{-1}$ в ИК-спектрах композитов видны две характерные интенсивные полосы поглощения, свидетельствующие об образовании карбоксилат анионов [4].

Для определения температурных переходов и степени кристалличности, полученных композитов провели исследований на дифференциальном сканирующем калориметре. Результаты исследования приведены в табл. 1.

Анализ результатов табл. 1 показывает, что температура плавления по сравнению с исходным ПТФЭ не изменилась, учитывая погрешность ±2℃. Наблюдается разница в значениях энтальпии плавления и степени кристалличности полученных композитов по сравнению с исходным ПТФЭ. Увеличение степени кристалличности показывает, что кристаллическая структура полимерной матрицы становится более упорядоченной с увеличением степени наполнения УНТ.

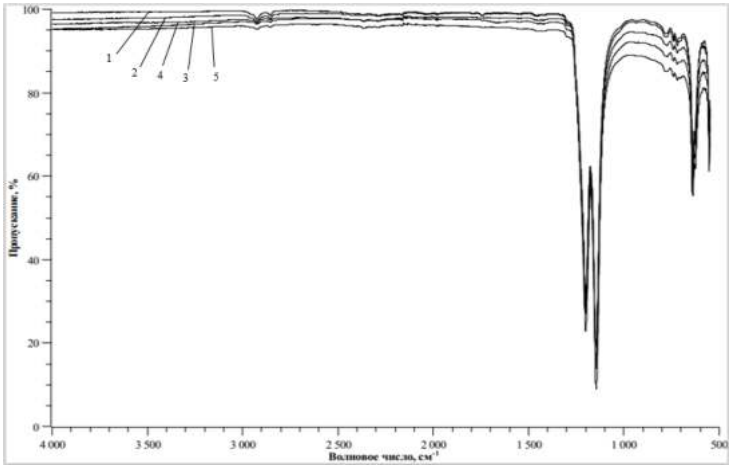


Рис. 5. ИК-спектры поглощения ПТФЭ, в зависимости от содержания наполнителей до трения: *1* – ПТФЭ + 0,1 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин; *2* – ПТФЭ + 0,2 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин; *3* – ПТФЭ + 0,5 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин; *4* – ПТФЭ + 1 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин; *5* – ПТФЭ + 2 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин

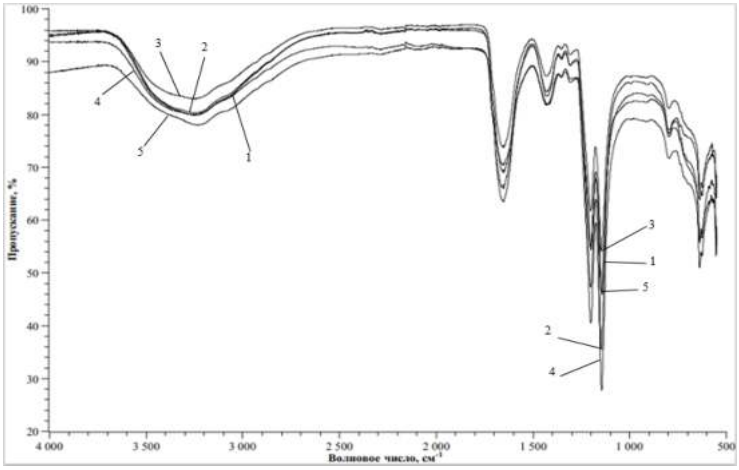


Рис. 6. ИК-спектры поглощения ПТФЭ, в зависимости от содержания наполнителей после трения: *1* – ПТФЭ + 0,1 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин; *2* – ПТФЭ + 0,2 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин; *3* – ПТФЭ + 0,5 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин; *4* – ПТФЭ + 1 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин; *5* – ПТФЭ + 2 % масс. УНТ + 1 % масс. каолин

Таблица 1

Результаты исследования композитов дифференциально-сканирующей калориметрии

Образец	Кристалличность α, %	Энтальпия плавления, ΔH, Дж/г	Тпл, ℃
Исх. ПТФЭ	37,69	30,91	331,3
ПТФЭ+0,1%УНТ+1%каолин	39,39	32,30	332,2
ПТФЭ+0,2%УНТ+1%каолин	38,40	31,49	332,1
ПТФЭ+0,5%УНТ+1%каолин	43,76	35,88	333,0
ПТФЭ+1%УНТ+1%каолин	43,19	35,42	332,9
ПТФЭ+2%УНТ+1%каолин	43,75	35,88	332,9

Заключение

Полученные результаты показывают перспективность комплексного наполнения ПТФЭ углеродными нанотрубками и каолином с целью разработки износостойких ПКМ. При малой

степени содержания УНТ (до 0,5 мас.%) у композитов существенное улучшение свойств по сравнению с ненаполненным полимером. Увеличение концентрации УНТ до 2 мас.% приводит к значительному повышению износостойкости (до 221 раз) и повышению коэффициента трения (на ~39 %), но приводит к снижению предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве.

Библиографический список

1. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / Ю.К. Машков [и др.] // М.: Машиностроение, 2005. 240 с.
2. **Липатов, Ю.С.** Физическая химия наполненных полимеров / Ю.С. Липатов // – М.: Изд-во «Химия», 1977. – 304 с.
3. **Игнатьева, Л.Н.** ИК-спектроскопические исследования политетрафторэтилена и его модифицированных форм / Л.Н. Игнатьева, В.М. Бузник // Российский химический журнал. – Т. LII. – № 3. – 2008. С.139-146
4. **Казицына, Л.А.** Применение УФ-, ИК- и ЯМР спектроскопии в органической химии. / Л.А. Казицына, Н.Б. Куплетская // Учеб. пособие для вузов. – М., «Высшая школа», 1971. – 264 с.

УДК 691.32 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_364

А.А. Чернильник (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ТИПЫ И ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ БЕТОНА НА ЕГО СВОЙСТВА

Аннотация. *Постоянно возрастающие требования к качеству и безопасности материалов диктуют необходимость рационального выбора не только компонентов материала, но также и его структуры. Одним из основных правил строительного материаловедения является принцип «состав – структура – свойства». Такой принцип позволяет, помимо объединения основополагающих положений материаловедения, использовать научный подход применительно к рассмотрению всего комплекса вопросов, связанных с изучением материала как основного элемента строительного производства, его поведения в эксплуатационных условиях. В статье проведен аналитический обзор влияния типов структуры цементных бетонов на их свойства. Рассмотрены такие типы структурной неоднородности бетона, как сегрегация, анизотропия, вариатропия. Отмечено влияние компонентного состава каждой из таких структур на свойства соответствующих бетонов.*

The ever-increasing requirements for the quality and safety of materials dictate the need for a rational choice not only of material components, but also of its structure. One of the basic rules of building materials science is the principle "composition - structure - properties". This principle allows, in addition to combining the fundamental provisions of materials science, to use a scientific approach in relation to the consideration of the entire range of issues related to the study of material as the main element of construction production, its behavior under operating conditions. The article provides an analytical review of the influence of the types of structure of cement concretes on their properties. Such types of structural heterogeneity of concrete as segregation, anisotropy, variatropy are considered. The influence of the component composition of each of these structures on the properties of the corresponding concrete is noted.

Ключевые слова: бетон, вибрирование, центрифугирование, фибра, структурная неоднородность, сегрегированная, анизотропия, вариатропия
Keywords: concrete, vibration, centrifugation, fiber, structural heterogeneity, segregated, anisotropy, variatropy

Бетоном называют искусственный каменный композиционный материал, представляющий собой затвердевшую смесь вяжущего вещества, затворителя, заполнителей и, при необходимости, добавок; при этом рационально подобранную, однородно перемешанную и тщательно уплотненную.

При этом, исходя из положений всех работ ученых, когда-либо занимавшихся вопросами технологии бетонов во всех его проявлениях, отмечается высокая степень неоднородности данного композита. Известно [1], что с технологической точки зрения практически невозможно получить полностью гомогенную структуру. Технология бетона направлена лишь на минимизацию пустот, пор, непрогидратировавших зерен, а также на максимально рациональную структуру бетона, которая в свою очередь согласно фундаментальным законам строительного материаловедения в том числе влияет на классическое соотношение состав → структура → свойства. Таким образом работами этих авторов также подтверждается прямое влияние структуры бетона на свойства затвердевшего композита.

Следует отметить многообразие рынка современных строительных материалов.

Сейчас, и в XXI веке особенно, активно развиваются технологии бетонов. Мы имеем большое количество видов бетона, варьирующихся по плотности, прочности, назначению и многим другим показателям. Бетон являлся и является строительным материалом № 1 и в XX и в XXI веке, и в обозримом будущем ни один строительный материал не сможет полноценно вытеснить бетон с объектов капитального строительства.

Неоднородность бетона многими исследователями (в основном занимавшихся вопросами традиционного вибрированного бетона) в глобальном смысле рассматривается как отрицательное свойство, деструктивно влияющее на качество получаемых бетонных и железобетонных конструкциях.

Так в работах в первую очередь Баженова Ю.М. и Гершберга О.А. [2], а также во многих других работах, описываются вибрированные бетоны. Как правило, это вертикально формуемые элементы, в которых при вибрировании возникает так называемое явление сегрегации, то есть расслоение смеси по высоте элемента. Таким образом бетон, состоящий из тяжелой фракции крупного заполнителя, получает следующую картину структуры: крупные тяжелые частицы оседают в нижней части элемента, а легкие частицы (если это мелкие или пористые заполнители, либо иные легкие компоненты) всплывают и оказываются наверху такого элемента. Таким образом при вертикальном вибрировании, будь это вибрирование на виброплощадке или погружение в смесь глубинных вибраторов, мы получаем расслоившийся элемент, который является неоднородным по высоте. Свойства его разнятся и зачастую это привносит большое количество проблем для проектировщиков и строителей. Таким образом основной задачей технологов, работающих с вибрированным бетоном, является рациональный подбор технологических и рецептурных факторов, в первую очередь частоты, амплитуды вибрации и иных показателей, которые более наглядно будут выглядеть в виде диаграмм Исикавы (рис. 1-3).

Рассмотрим другой вид бетона, принципиально отличающийся по технологии, структуре и, следовательно, по свойствам. Это так называемый вариатропный бетон, как правило имеющий кольцевое сечение и производимый способами центробежного уплотнения бетонной смеси.

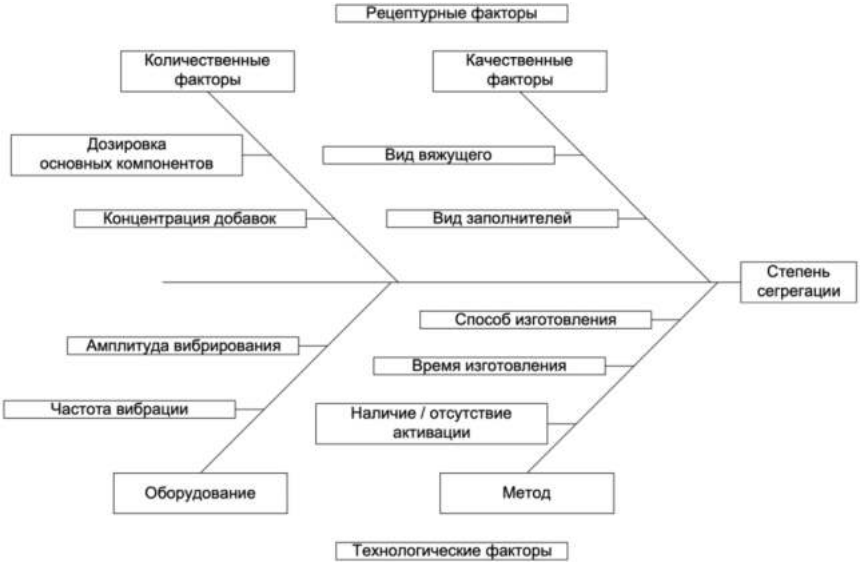


Рис. 1. Диаграмма Исикавы: факторы, влияющие на степень сегрегации

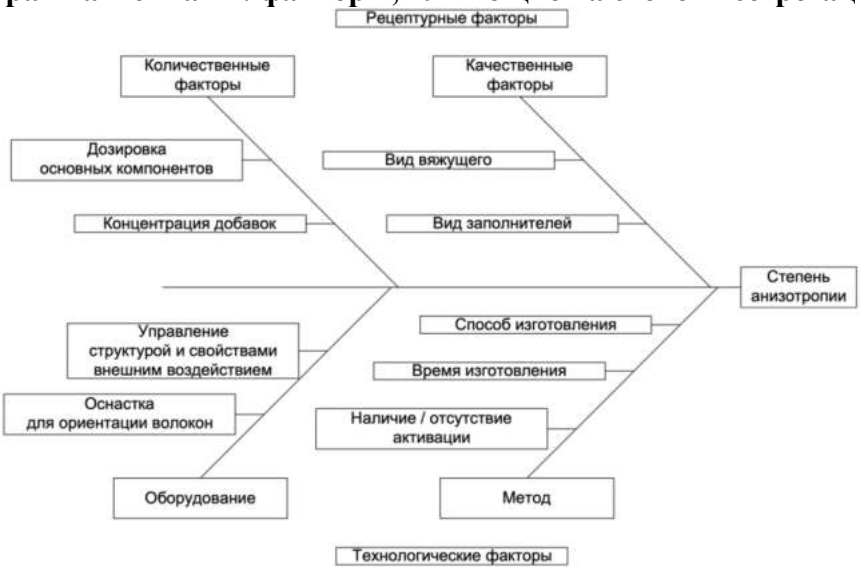


Рис. 2. Диаграмма Исикавы: факторы, влияющие на степень анизотропии

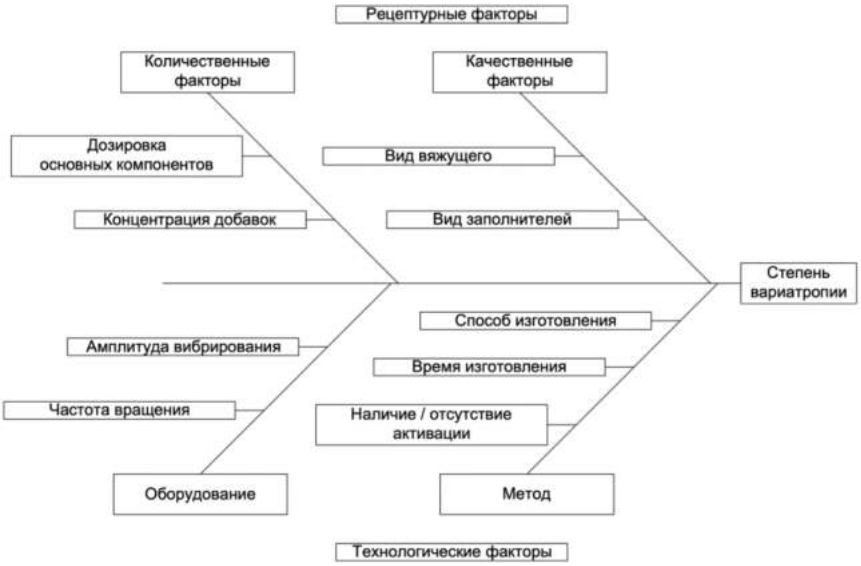


Рис. 3. Диаграмма Исикавы: факторы, влияющие на степень вариатропии

Если в случае с вибрационным уплотнением мы имеем в виду силу тяжести, которая помогает уплотнить бетон, то в случае с центробежным уплотнением мы сталкиваемся с центробежными силами, которые уплотняют бетон при раскрутке бетонной смеси в центрифугах.

Известны работы Ахвердова И.Н. [3-4], Гершберга О.А., Кудзиса А.П. [5], Маиляна Л.Р., Пастушкова Г.П. [6], Штаермана Ю.Я. [7] и многих других выдающихся ученых, занимавшихся центрифугированными бетонами.

В случае центробежного уплотнения бетонной смеси вариатропная структура камня в классической теории рассматривалась как отрицательное свойство и предпринимались попытки такую структуру, представляющую собой различие свойств не по высоте элемента, а по его сечению, свести к минимуму. Для этого предпринимались различные попытки рецептурных и технологических регулирований этой структуры. Известны работы, проводившиеся в Ростове-на-Дону, а также в Минске, Москве и Вильнюсе, направленные на технологию и расчет центрифугированных элементов. При этом вводились различные элементы в состав бетонной смеси для того, чтобы усреднить вариатропию и попытаться сделать ее близкой к нулю, нейтрализовав ее по всему сечению.

Однако впоследствии в ДГТУ (ранее РГСУ и РИСИ) в работах в рамках научной школы Маиляна Л.Р., академика РААСН, были достигнуты результаты, подтверждающие положительный эффект от вариатропии при рациональном выборе рецептурно-технологических факторов и правильном учете вариатропных свойств бетона при расчете конструкций. Так, была доказана эффективность и выявлены скрытые резервы несущей способности вариатропных сечений у виброцентрифугированных бетонов [8]. Там вариатропия имела ярко выраженный характер, однако, с помощью разработанных расчетных рекомендаций, была получена рациональная методика расчета и проектирования таких конструкций и было вскрыто порядка 30 % с прочности, находящейся в резервах. Тем самым, вариатропность при явных преимуществах таких пустотелых конструкций, легких по весу и маломатериалоемких по содержанию приводила к достаточно существенному экономическому, технологическому и эксплуатационному эффекту.

Продолжая рассмотрение структур бетона, следует отметить анизотропные его свойства. Анизотропия – явление более характерное для других материалов, таких, как например древесина. То есть это волокнистые материалы, которые в одном направлении имеют свойства, разительно отличающиеся от свойств в поперечном направлении.

Для бетона такое явление работы характерно для исследований, посвященных влиянию фибрового, то есть дисперсно-волокнистого армирования бетонов. Такие работы проводились для фибропенобетонов, то есть дисперсно-армированных ячеистых бетонов, например, в работах Моргун Л.В. [9], в тяжелых и облегченных бетонах – в работах под руководством Маиляна Л.Р. [10, 11]. В работе Матуса Е.П. была рассмотрена возможность управления направленным фибровым армированием бетонов с помощью магнитного поля. Ориентация им фибр в пространстве в теле бетона задавала существенную анизотропию, однако такая анизотропия схожа с традиционным стержневым армированием и несет основные преимущества именно для изгибаемых элементов [12].

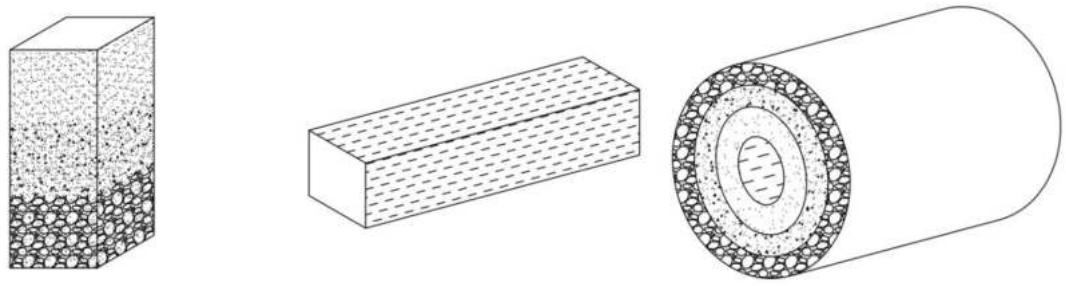
Таким образом подытожив, можно выделить три различных типа структуры бетона (рис. 4):

- сегрегированная структура, то есть неоднородность по высоте элемента;
- анизотропия, где в одном направлении структура бетона имеет совершенно другие свойства чем в другом;
- вариатропная структура, то есть неоднородность по сечению.

Подводя итоги проведенного анализа, можно сделать следующие выводы.

Структурная неоднородность является неустранимым спутником бетона и присутствует во всех типах бетонов, лишь в некоторых сводясь к минимуму.

При этом с точки зрения технологии можно лишь корректировать неоднородность, управлять ею, но всегда какая-то доля неоднородности остается.



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Типы структурной неоднородности бетона:
а) сегрегированная *б)* анизотропная *в)* вариатропная

Таблица 1

Особенности структур бетона

Тип структуры бетона	Характерная технология	Достоинства	Недостатки
Сегрегация	Вибрирование	Простота в изготовлении	Расслоение по высоте, массивность конструкций
Анизотропия	Дисперсное армирование изгибаемых элементов	Возможность управления свойствами бетона в нужном направлении	Применимость в основном для изгибаемых элементов
Вариатропия	Центробежное уплотнение	Легкий вес конструкций, малая материалоемкость	Сложность в изготовлении, невозможность монолитного изготовления элемента по месту строительства

С точки зрения же конструкторов и проектировщиков основной задачей является правильный учет этой неоднородности для того, чтобы получать наиболее эффективные конструкции и изделий.

Таким образом из рассмотренных типов структурной неоднородности однозначно наибольшими недостатками обладает сегрегация. Такие бетоны являются наименее перспективными с точки зрения эксплуатации и сегрегация – явление, однозначно подлежащее максимальному устранению с точки зрения технологов и это явление отрицательное со всех точек зрения.

Что касается анизотропии то это специфическое свойство ввиду заведомо иной структуры бетона в отличии от древесных волокнистых материалов, которым в наибольшей степени присуща анизотропия. Такая неоднородность может быть создана с помощью технологии, но такие анизотропные изделия ограничены в своей эксплуатации. Как правило – это изгибаемые элементы, которые имеют направленное армирование дисперсное при этом следует отметить, что наиболее эффективно можно управлять армированием именно игольчатыми жесткими волокнами с помощью магнитных полей, а управлять мягкими волокнами можно лишь распушая их и загружая их в определенной последовательности в смеситель.

Наибольшей же, с нашей точки зрения, перспективой обладают именно вариатропные конструкции с неоднородной структурой бетона по своему сечению. Здесь вариатропия в отличии от анизотропии имеет замкнутый по сечению характер и способствует управлению свойствами конструкции, ввиду того, что работает внешний контур и отсутствуют разрывы именно в рабочем сечении. Таким образом у таких конструкций имеется определенный запас

и резерв прочности, которые можно эффективно использовать технологами, конструкторами и проектировщиками для создания новых типов эффективных строительных изделий и конструкций.

Библиографический список

1. **Баженов, Ю.М.** Технология бетона / Ю.М. Баженов // М.: Изд-во АСВ. – 2007. – 528 с.
2. **Гершберг, О.А.** Технология бетонных и железобетонных изделий / О.А. Гершберг // Стройиздат, М. – 1965.
3. **Ахвердов, И.Н.** Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов // М.: Стройиздат. – 1981. – 464 с.
4. **Ахвердов И.Н.** Железобетонные напорные центрифугированные трубы / И.Н. Ахвердов // М.: Стройиздат. – 1969. – 164 с.
5. **Кудзис, А.П.** Железобетонные и каменные конструкции (Ч.1. Материалы, конструирование, теория и расчет) / А.П. Кудзис // – М.: «Высшая школа». – 1988. – 286 с.
6. **Пастушков, Г.П.** Многоэтажные каркасные здания с несущими железобетонными центрифугированными элементами: дис. д-р техн. наук: 05.23.01, 05.23.05. – БГПА, Минск. – 1994.
7. **Штаерман, Ю.А.** Центрифугированный бетон / Ю.А. Штаерман // Тифлис: Техника да Шрома, – 1933. – 106 с.
8. **Холодняк, М.Г.** Совершенствование расчета и технологии создания виброцентрифугированных железобетонных колонн с учетом вариатропии структуры: дис. канд. техн. наук: 05.23.01, 05.23.08. – ДГТУ, Ростов-на-Дону. – 2020.
9. **Моргун, Л.В.** Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения: дис. д-р техн. наук: 05.23.05. – РГСУ, Ростов-на-Дону. – 2005.
10. **Булавин, В.А.** Газобетон для монолитных ограждающих конструкций с вариатропной поровой структурой: дис. канд. техн. наук: 05.23.05. – РГСУ, Ростов-на-Дону. – 2004.
11. **Айвазян, Э.С.** Технологии создания и методы расчета фибробетонных и фиброжелезобетонных элементов с агрегированным распределением волокон: дис. канд. техн. наук: 05.23.01; 05.23.08 – РГСУ, Ростов-на-Дону. – 2013.
12. **Матус, Е.П.** Воздействие магнитного поля на структуру и свойства цементно-песчаного сталефибробетона: дис. канд. техн. наук: 05.23.05. – НГАСУ, Новосибирск. – 2000.

СЕКЦИЯ 6.
Методы и средства испытаний на трение и износ

УДК 656.22 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_370

А.Д. Захаров, К.А. Лещев (FIANUM LLC), **Deepak H. Veeregowda, Fabio Alemanno** (Ducom Instruments Europe B.V.)

Исследование сцепления при сверхнизком коэффициенте скольжения с использованием трибометра DUCOM Twin disk (диск-диск)

Аннотация. *Трибометр DUCOM Twin Disc (Роликовая машина трения) предназначена для испытаний на усталостную выносливость, трение и износ материалов, анализируемых при качении и скольжении. Наиболее распространены испытания материалов для исследования процессов в подшипниках качения, шестернях, кулачковых толкателях, сопряжениях рельсов с колесами в автомобильной, авиационной, железнодорожной и металлургической промышленностях. Установка Twin Disc позволяет воспроизводить нагрузки на образец величиной до 8000Н и скорость вращения контактной пары трения до 3000 об/мин. Испытания могут проводиться в условиях сухого трения и при подаче смазочного материала в зону контакта.*

The Ducom Roller on Roller Tribometer is used for friction, fatigue and wear testing of materials that experience rolling and sliding, for example, materials used in rolling element bearings, gears and cam followers within the transportation industry. The Ducom Roller on Roller Tribometer can achieve a maximum test load of up to 8000 N and a maximum speed of up to 3000 rpm during pure rolling (100% slip), sliding/rolling and pure sliding (0% slip). The experiments can be conducted in lubricated or dry conditions.

Ключевые слова: трибология, сверхнизкий коэффициент скольжения, адгезия, коэффициент трения, tribology, ultra-low slip ratios grease friction behavior, wear behavior, wear resistance, adhesion energy, friction coefficient
Keywords: tribology, ultra-low sliding coefficient, adhesion, friction coefficient, tribology, ultra-low sliding coefficients, lubrication behavior during friction, wear behavior, wear resistance, adhesion energy, friction coefficient

Роликовые скользящие контакты являются неотъемлемой частью подшипников, систем передачи, сопряжения рельсов с колесами, а прокатные станы обычно подвергаются высоким контактным давлениям (от 1,5 до 4 ГПа) с коэффициентом скольжения (от 0 до 100%). Фактические коэффициенты скольжения зависят либо от проектной конфигурации (например, размеров ведущей и ведомой шестерен), либо от характеристик сцепления между поверхностями (например, контакт кулачка с толкателем, валки на сталеплавильных заводах), которые регулируются реологией смазки и характеристиками вязкости-давления. (см. рисунок 1А). Более высокое сцепление увеличивает величину подповерхностного напряжения сдвига и перемещает максимумы ближе к поверхности, что приводит к поверхностному повреждению (см. Рисунок 1В).

Один из таких сценариев - прокатные станы, где электронная мобильность стимулирует производство современной высокопрочной стали (AHSS) для более легких конструкций и неориентированных электротехнических сталей для эффективных сердечников тяговых двигателей. В типичной конфигурации 4-х роликов (см. Рисунок 2), неэффективная смазка может привести к усталостному разрушению и чрезмерному износу рабочих и опорных валков, что снижает точность приборов и плоскостность во время холодной прокатки.

Трибометр Ducom Twin Disc (см. рисунок 3) использовался для оценки сцепления смазочного материала при сверхнизком коэффициенте скольжения, который имитирует условия контакта опорного и рабочего валков в соответствии с параметрами испытаний в таблице 1.

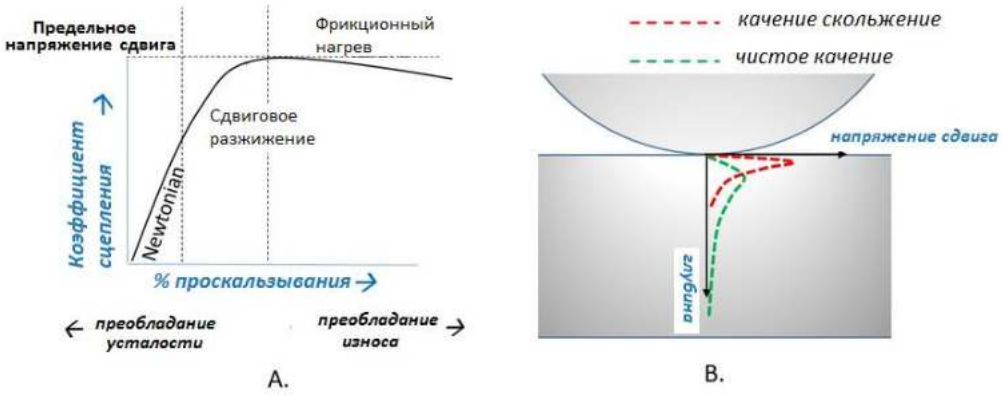


Рис. 1. Кривая сцепления для смазочных материалов в зависимости от процента проскальзывания с преобладающими механизмами разрушения *(A)*, влияние сцепления на профиль подповерхностных напряжений в контактах качения-скольжения по сравнению с чистым качением *(B)*

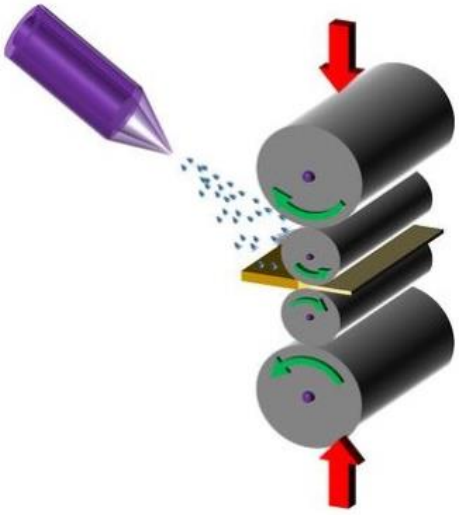


Рис. 2. Типичный четырехвалковый прокатный стан с смазываемым рабочим валком и более крупными опорными валками. Опорные валки приводятся в движение рабочими валками

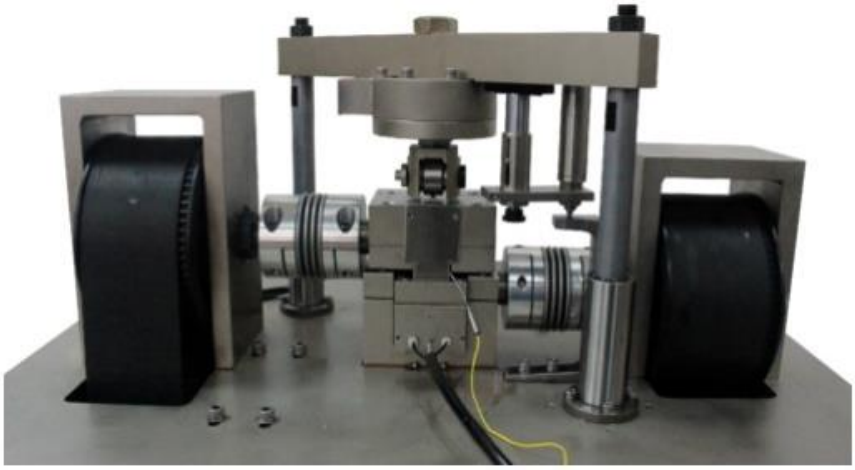


Рис. 3. Пример испытательной зоны прибора Ducom с двумя дисками (ролик на ролике)

Параметры испытаний были выбраны для моделирования взаимодействия между опорным валком и рабочим валком со средним контактным давлением Герца 1,5 ГПа. Это было достигнуто при нормальной нагрузке в 2200 Н между валком с выпуклой поверхностью и плоским валком (см. Рисунок 4) при стабильности нагрузки >0,5%. Шероховатость поверхности стальных роликов EN31 составляла 0,4 мкм, а твердость по Роквеллу - от 58 до 62.

Таблица 1

Параметры испытаний, используемые для испытаний на сверхнизкое значение коэффициента скольжения

Параметр	Ед-ца измерения	Протокол испытаний 1	Протокол испытаний 2
Скорость	об/мин	500 (нижний) 499-495 (верхний)	1000 (нижний) 998-990 (верхний)
Коэффициентт скольжения	-	0,2% 0,4% 0,6% 0,8% 1,0%	
Нормальная нагрузка	Н	2200	
Макс. контактное давление	ГПа	2,255	
Среднее контактное давление	ГПа	1,503	
Длительность теста	мин	30	
Смазка	-	сложноэфирное синтетическое масло	
Температура смазки	°С	75	

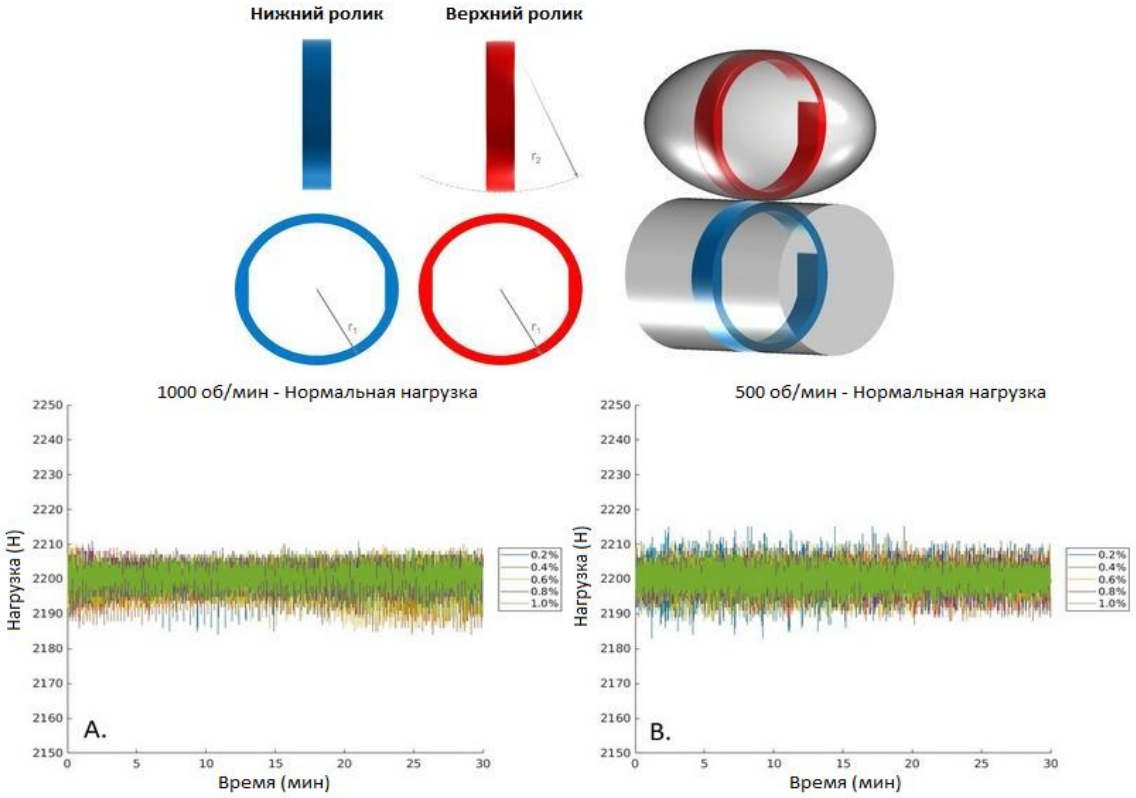


Рис. 4. Трехмерная реконструкция плоского (диаметр 47 мм) и выпуклого ролика (диаметр 47 мм, радиус сферы 47 мм), используемых в Ducom Twin Disc, и колебания нагрузки в реальном времени при 2200 Н. Точность нагрузки лучше, чем 0,5% при 2200 Н.

Ducom Twin Disc имеет два диска, которые приводятся в движение серводвигателями независимо, что обеспечивает точное отдельное управление скоростями с точностью <0,1 об/мин для достижения сверхнизкого коэффициента скольжения 0,1%. Измеренная скорость и ее стабильность во время испытания для верхнего и нижнего роликов показаны на рисунке 5, а рассчитанные коэффициенты скольжения - на рисунке 6.

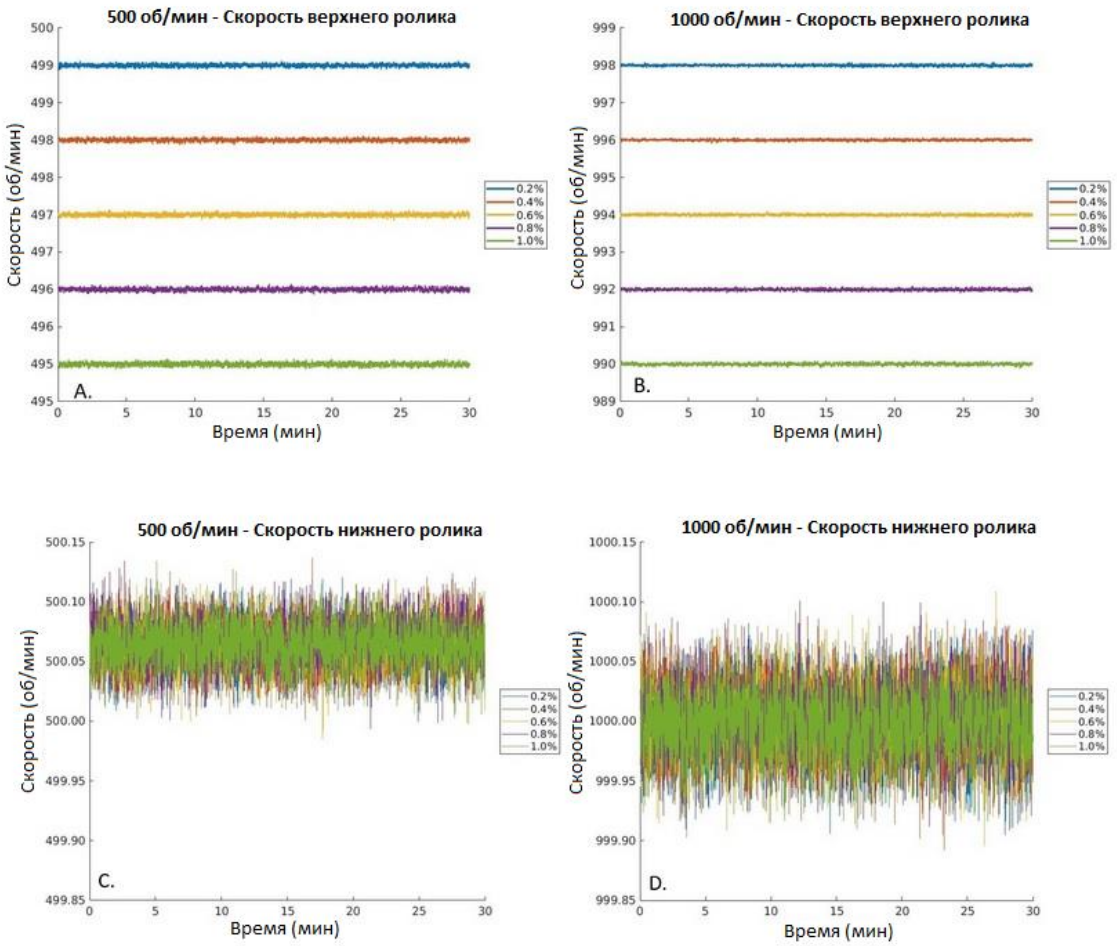


Рис. 5. Изменения скорости верхнего и нижнего роликов в реальном времени. Точность и стабильность скорости <0,1 об/мин

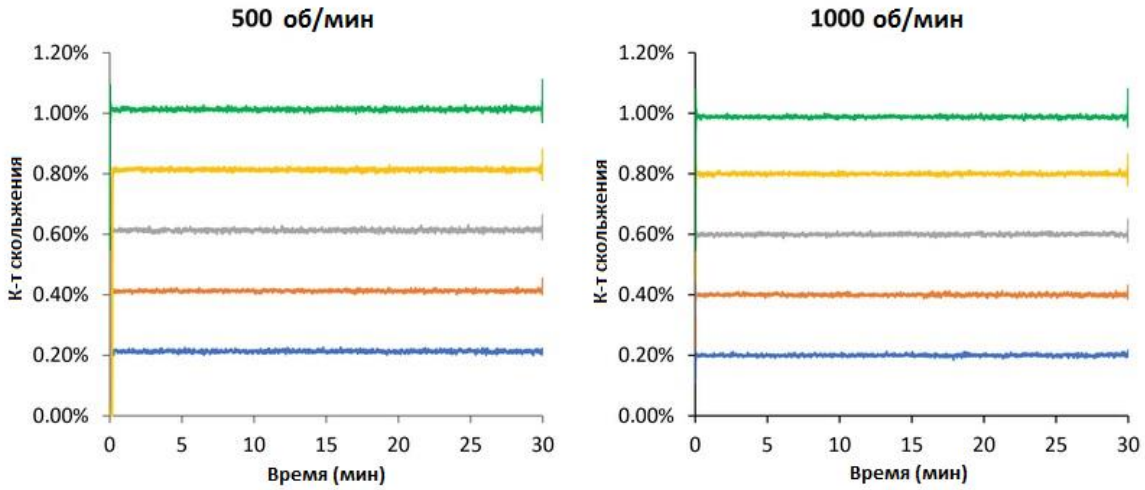


Рис. 6. Расчетные коэффициенты скольжения и их стабильность при 500 и 1000 об/мин

Трение на границе качения и скольжения было измерено с помощью тензометрического датчика, подключенного к корпусу верхнего ролика, измеренный коэффициент трения показан на рисунке 7.

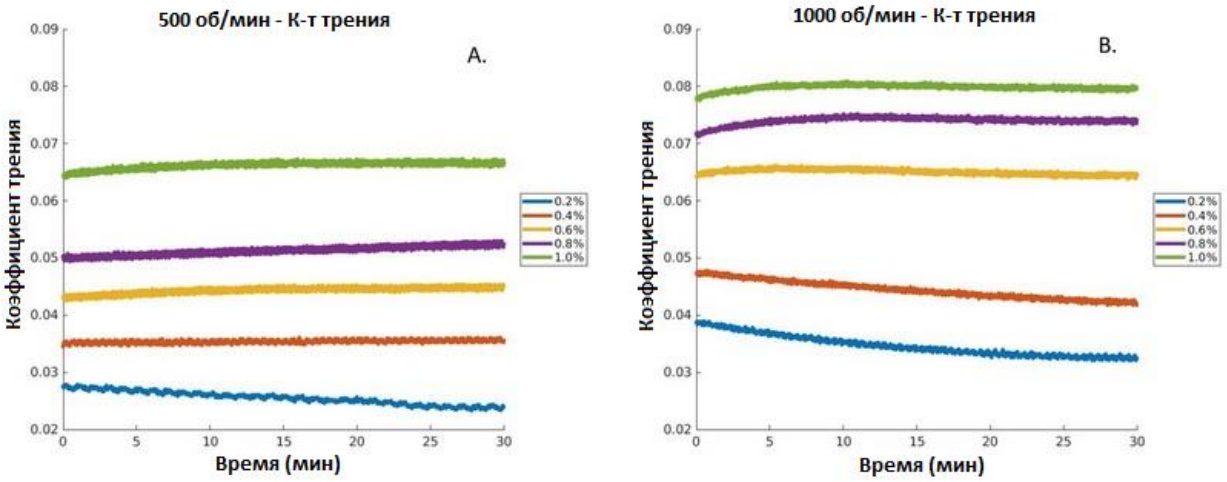


Рис. 7. Изменение коэффициента трения в реальном времени при 500 об/мин (A) и 1000 об/мин (B)

Средний коэффициент трения при каждом коэффициенте скольжения показан на рисунке 8. Коэффициент трения линейно увеличивается с процентом скольжения для испытаний как при 500 об/мин, так и при 1000 об/мин. Это указывает на реологическое поведение смазки «ньютоновского» типа в режиме смазки микро-EHL, что согласуется с характеристической кривой сцепления (см. Рис. 1A).

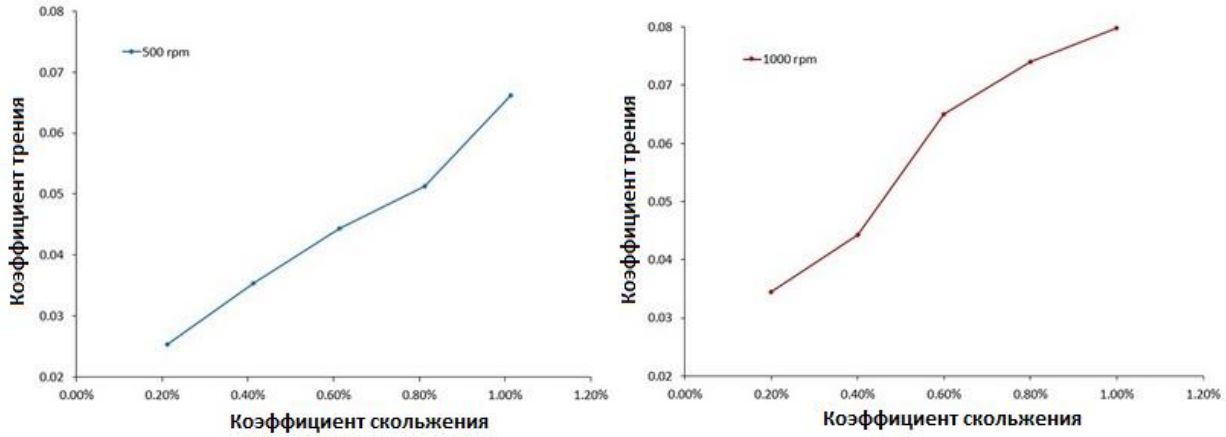


Рис. 8. Зависимость между коэффициентом трения и коэффициентом скольжения при 500 и 1000 об/мин

Трибометр Ducom Twin Disc может точно контролировать сверхнизкий коэффициент скольжения (0,2% и ниже) и с высокой точностью измерять сцепление на контакте качение-скольжение. В сочетании с возможностью достижения контактного давления 4 ГПа (стальная поверхность, конформный контакт) и температуры до 700 °C это может вывести трибологические испытания в вашей лаборатории на новый уровень.

Ducom Twin Disc - идеальный инструмент для исследования характеристик и долговечности контактов качения-скольжения в автомобильных трансмиссиях, подшипниках, операциях прокатки металла и контакте железнодорожный рельс-колесо.

УДК 620.1.051 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_375

М.В. Прожега, Е.О. Рещиков (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова), **С.В. Чернышов** (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова; МГТУ им. Н.Э. Баумана)

РАЗРАБОТКА СЕРИИ СТЕНДОВ «ТРИБОТЕСТ» ДЛЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ В СООТВЕТСТВИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ СТАНДАРТАМИ

Аннотация. *В работе представлен анализ современного состояния экспериментальной техники для испытаний на трение и износ в России. Приведены результаты разработки испытательной техники сотрудниками ИМАШ РАН. Представлены потребности отечественных компаний в испытательной технике и услугах на трибологические исследования на основе опыта работы отдела «Трение, износ и смазка. Трибология» Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.*

The paper presents an analysis of the current state of experimental equipment for friction and wear tests in Russia. The results of the development of test equipment by employees of IMASH RAS are presented. The needs of domestic companies in testing equipment and services for tribological studies based on the experience of the department "Friction, wear and lubrication. Tribology" of the A. A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences.

Ключевые слова: испытательная техника, трибология, трение, износ, смазка.
Keywords: testing equipment, tribology, friction, wear, lubrication.

Испытания на трение и износ условно делят на лабораторные, полунатурные и натурные. К лабораторным испытаниям можно отнести методики, использующие простейшие кинематические схемы, в соответствие с которыми можно сравнить материалы по износостойкости и коэффициенту трения [1-2].

Отечественное оборудование для лабораторных испытаний ограничено машинами трения ИИ5018, УМТ-1, ЧМТ-1. Машина трения ИИ5018, являющаяся модернизированной машиной трения СМТ-1, позволяет проводить испытания цилиндрических образцов, образцов типа «кольцо-кольцо», колодка-ролик. Стоимость машины ИИ5018 начинается от 3 795 115 руб. на момент 2021 года [3]. Опыт работы на машинах трения типа СМТ-1 показывает, что отсутствие системы самоустановки образцов приводит к необходимости изготавливать образцы с высокой точностью и даже в этом случае не гарантируется постоянство распределения нагрузки по площади контакта. Сравнение результатов испытаний по данной методике, сделанных в разных лабораториях затруднено. Проведенный нами анализ показывает, что отечественного оборудования для проведения испытаний по схеме шар-диск на рынке нет, а стоимость импортной машины трения (например, NEO-Tribo MFW120) начинается от 4 млн. рублей.

Вывод на зарубежный рынок отечественной продукции сопровождается необходимостью проверки эксплуатационных свойств по международным стандартам. Наибольшее распространение за рубежом получила методика ASTM G99, основанная на трении шарика или штифта о вращающийся диск. Эту методику отличает простота проведения испытаний. По ней можно сравнивать фрикционные свойства материалов, покрытий при работе без смазочного материала. Переносить характеристики процесса трения на реальные узлы стоит очень внимательно. Необходимо, чтобы реальный узел трения имел схожую кинематику и условия эксплуатации. Так в работе [4] сравнивали результаты лабораторных испытаний материалов тормозных колодок по схеме штифт-диск с испытаниями на динамометрическом инерционном стенде. Авторы получили одинаковые значения коэффициента трения и коэффициента износа при комнатной температуре.

К лабораторным можно также отнести испытания смазочных свойств масел и пластичных смазочных материалов. Широко распространенная четырехшариковая машина

трения (ЧМТ или ЧШМ) позволяет оценивать противоизносные и противозадирные свойства смазочных материалов по ГОСТ 9490-75 «Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик».

Испытания на четырехшариковой машине позволяют также оценить температурную стойкость смазок при различных температурах в соответствии с ГОСТ 23.221-84 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении». При сохранении кинематической схемы нагрузки на шарики в последнем ГОСТе значительно ниже, чем в ГОСТ 9490-75, поэтому в ИМАШ РАН для оценки температурной стойкости смазок разработана и используется машина трения КТ-2. Так, машину трения КТ-2 использовали в работе [5] при исследовании пластичных смазочных материалов для работы в космосе. Смазки, предназначенные для работы при высокой температуре, должны показывать низкое значение коэффициента трения во всем рабочем диапазоне температур.

Четырехшариковые машины трения от зарубежных производителей отличаются высокой стоимостью (например, K93190 от Koehler Instrument Company) от 4,6 млн. руб. и длительными сроками поставки оборудования. Отечественные производители ориентированы на ГОСТ. Система нагружения в серийных установках – рычажная, что не позволяет плавно изменять нормальную силу. Это, в свою очередь, снижает исследовательский потенциал оборудования.

К полунатурным испытаниям, востребованным в настоящее время, можно отнести европейскую методику EAD 050004-00-0301 [6] для оценки износостойкости СВМПЭ, применяемых в опорах мостов, стандарт M-107/M-208 [7], распространяемый на материалы колес железнодорожного транспорта США. В перечисленных стандартах скорость скольжения, удельные нагрузки в зоне трения и другие параметры испытаний максимально приближены к реальным условиям работы узлов.

Цель представленной работы – разработать и изготовить оборудование для проведения трибологических испытаний в соответствии с российскими и международными стандартами. Для исследований материалов и покрытий при трении скольжения – трибологический стенд, работающий по кинематической схеме штифт-диск или шар-диск (стандарт ASTM G99), для исследования смазочных материалов – четырехшариковую машину трения (стандарты ASTM D 2783, ASTM D-2266, ASTM D 5183, ASTM D-4172, ГОСТ 9490-75, ГОСТ 23.221-84).

Таблица 1

Технические характеристики стенда Триботест-01

№	Параметр	Значение
1	Кинематическая схема	Шар-диск (штифт-диск)
2	Регистрируемые параметры	Коэффициент трения
3	Диапазон измерения коэффициента трения f	0,05…1 (±1,5%)
4	Скорость скольжения, м/с	0,1…1
5	Максимальное усилие на шарик N, Н	25
6	Диаметр шарика D, мм	6; 10
7	Размер образца, мм	Ø40
8	Максимальный крутящий момент, Н·м	1
9	Мощность двигателя, не менее, кВт	0,3
10	Габариты, мм	360х220х600
11	Среда для испытаний	Воздух
12	Температура образцов	Комнатная

В настоящее время разработан и эксплуатируется стенд для испытаний на трение и износ «Триботест-01» (машина трения шар-диск) [8]. Технические характеристики стенда приведены в табл. 1, внешний вид показан на рис. 1.

Рис. 1. Испытательный стенд Триботест-01

Стенд позволяет проводить испытания в широком диапазоне скорости скольжения, нагрузки, размеров образцов и с различными контробразцами. Плавное регулирование скорости во время испытания достигается за счет использования асинхронного двигателя с преобразователем частоты. Перемещение каретки с установленной на ней датчиком и индентором позволяет изменять радиус трения и испытывать образцы с небольшими участками исследуемой поверхности и покрытия. Предусмотрена возможность испытания с контробразцом в виде штифта, универсальный кронштейн позволяет устанавливать индентор необходимой формы и размера. При испытаниях по схеме шар-диск можно использовать шарики диаметром 6 и 10 мм.

Система управления и записи данных испытаний организована через плату MyDAQ от National Instruments. Программное обеспечение стенда (рис. 2) на базе LabVIEW позволяет задавать скорость скольжения, устанавливать критерий остановки испытания и выводить на экран коэффициент трения во время испытания. В программе установлена защита стенда от перегрузок. Используемое программное обеспечение позволяет интегрировать дополнительные датчики или модули управления. В одном из стендов, который в настоящее время работает в компании по производству антифрикционных покрытий ООО "Моденжи", г. Брянск, установлен дополнительно датчик температуры в зоне испытания. Электрические компоненты и компьютер размещены в корпусе стенда, который оснащен вентилятором для охлаждения двигателя и аппаратуры.

Необходимость испытаний антифрикционных покрытий при пониженных нагрузках требует создания более чувствительного оборудования. Поэтому нами разработан стенд для испытаний на трение и износ в соответствии со стандартом ASTM G99 Триботест-02, который является настольной версией предыдущей модели. Технические характеристики стенда приведены в таблице 2. Благодаря компактному настольному исполнению стенд может быть установлен в любой лаборатории, где есть необходимость производить трибологические

испытания. К образцам для испытаний не предъявляются специальные требования, поэтому можно проводить экспресс-тесты сразу при нанесении покрытий.

Таблица 2

Технические характеристики стенда Триботест-02

№	Параметр	Значение
1	Кинематическая схема	Шар-диск (штифт-диск)
2	Регистрируемые параметры	Коэффициент трения
3	Диапазон измерения коэффициента трения f	0,01…0,5 (±1,5%)
4	Скорость скольжения, м/с	0,1…1,5
5	Максимальное усилие на шарик N, Н	5
6	Диаметр шарика D, мм	3; 6
7	Размер образца, мм	Ø40
8	Максимальный крутящий момент, Н·м	0,2
9	Мощность двигателя, не менее, кВт	0,1
10	Габариты, мм	260x220x200
11	Среда для испытаний	Воздух
12	Температура образцов	30…300 ^{0} С
13	Исполнение	Настольное

На рис. 2 представлена 3D-модель разработанной четырехшариковой машины трения Триботест-03. Основные технические характеристики машины трения Триботест-03 представлены в табл.3.

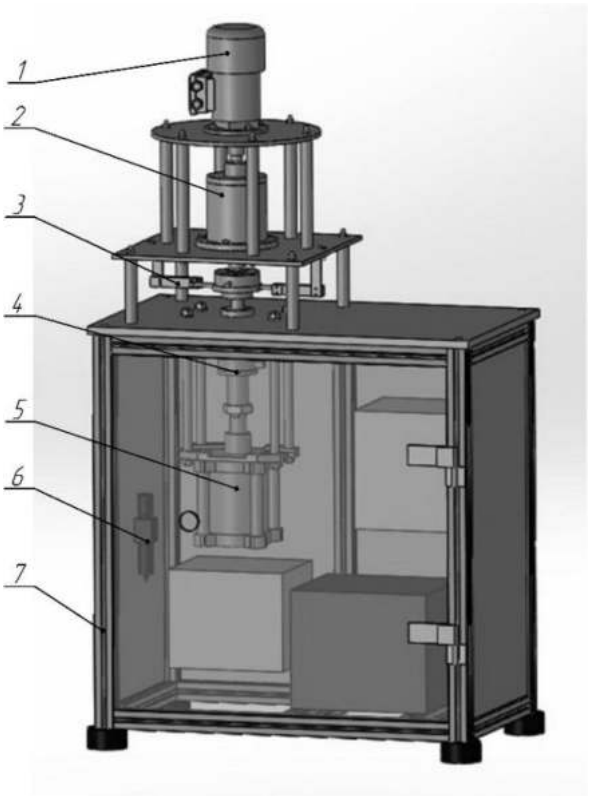


Рис. 2. Модель 4-шариковой машины трения

1 – электродвигатель, *2* – шпиндель, *3* – тензодатчик, *4* – датчик усилия, *5* – пневмоцилиндр, *6* – манометр, *7* – рама

Электродвигатель 1 с частотным преобразователем обеспечивают вращение шарика с частотой, заданной условиями испытаний. Компенсирующая муфта устраняет погрешность установки двигателя и шпинделя 2, который состоит из корпуса и двух подшипников: радиально-упорного и радиального. Коэффициент трения во время испытаний определяем при помощи тензодатчика 3, который удерживает чашку с закрепленными тремя неподвижными шариками от проворота под действием силы трения, возникающей при вращении верхнего шарика под нормальной нагрузкой. Защита тензодатчика от превышения допустимой силы трения из-за возможного сваривания шариков обеспечивается за счет установки жестких упоров. Осевая нагрузка испытания контролируется датчиком 4. Сферический упор передает осевую нагрузку от пневмоцилиндра 5 и имеет возможность самоустановки, чтобы обеспечить перпендикулярность линии действия осевой силы. Для контроля давления в пневмоцилиндре используется манометр 6. Электрическая часть разделена на силовую часть и измерительно-сигнальную. Сжатый воздух для пневмоцилиндра нагнетает компрессор. Жесткость конструкции обеспечивается единой рамой 7.

Таблица 3

Технические характеристики стенда Триботест-03

№	Параметр	Значение
1	Кинематическая схема	4 шарика
2	Регистрируемые параметры	Коэффициент трения, температура, усилие на штоке
3	Диапазон измерения коэффициента трения	0,002…1 (±1,5%)
4	Скорость вращения, об/мин	30...3 000
5	Максимальное осевое усилие, Н	12 000
6	Диаметр шариков, мм	12,7
7	Температура образцов	30…300 ^{0} С

Разработанная четырехшариковая машина трения позволяет проводить трибологические испытания в соответствии с международными стандартами ASTM D-2266 и ASTM D-4172 в широком диапазоне нагрузок, скоростей скольжения и температур. Испытания по методу 4 шариков подразумевают высокие нагрузки на образцы. Для обеспечения требуемых нагрузок и возможности их регулировки традиционно используют рычажные системы нагружения с подвешиваемыми грузами. Это затрудняет работу оператора, поскольку для создания экстремальных нагрузок приходится подвешивать грузы с общей массой 100 кг и более, а изменение нагрузки на разных этапах испытания требует сборки и разборки комплекта гирь. В разработанной схеме мы используем пневмоцилиндр, что значительно упрощает работу оператора и позволяет плавно регулировать нагрузку. Возможность плавного изменения нормального усилия открывает перед исследователями возможность изучить динамику изменения коэффициента трения при изменяющейся нагрузке.

Заключение

Разработана серия трибологических стендов «Триботест» для проведения испытаний на трение и износ в соответствии с международными стандартами по схеме шар-диск (ASTM G99) и по методу 4 шариков (ASTM D-2266 и ASTM D-4172). Стенды позволяют проводить испытания в широком диапазоне нагрузок и скоростей, фиксируют при помощи датчиков коэффициент трения.

Библиографический список

1. SR EN ISO 20623 - A standard for tribological evaluation of lubricants that may bust innovation / L. Deleanu [et al.] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020, – 997, – 012008

2. **Borawski, A.** Common Methods in Analysing the Tribological Properties of Brake Pads and Discs – A Review / A. Borawski // Acta Mechanica et Automatica, – 2019, – vol.13, no.3, – P. 189-199.

3. ТОЧМАШПРИБОР ИИ Машины для испытания на усталость, трение, износ металлов и сплавов сайт. — URL: https://tochmashpribor.nt-rt.ru/price/catalog/234764 (дата обращения: 29.09.2021).

4. A critical comparison of dynamometer data with pin-on-disc data for the same two friction material pairs – A case study / M. Federici [et al.] // Wear, – 2019, – vol. 424–425, – P. 40-47.

5. Temperature Resistance of Russian Vacuum Lubricants / A.Yu. Albagachiev [et al.] // Russian Engineering Research. – 2019, – vol. 39, – P. 1011–1013.

6. European Assesment Document EAD 05000-00-0301. Spherical and cylindrical bearing with special sliding material made of UHMWP (ultra high molecular weight polyethylene)

7. TTCI Association of American Railroads — URL: https://www.ttci.tech/ttci-overview (дата обращения: 29.09.2021)

8. **Prozhega, M.V.** Solid lubricating coatings tribological test rig development / M.V. Prozhega, E.O. Reschikov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021, – 1129, – 012029

СЕКЦИЯ 7.
Экологические и экономические проблемы транспортных трибосистем

УДК 665.765.404 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_381

В.В. Соловьев, канд. техн. наук, **А.В. Соколов,** канд. техн. наук, **А.В. Маркелов,** канд. техн. наук, **М.С. Ермаков** (Ярославский Государственный Технический Университет)

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖИРОВ РАСТИТЕЛЬНОГО И ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Аннотация. *Повышенное внимание к экологическим проблемам, ограниченность запасов нефти газа и других твердых источников химического сырья (каменный уголь, сланцы, торф), а также высокая стоимость синтетических продуктов вызывают настоятельную необходимость поиска альтернативных углеводородов для производства смазочных материалов. В настоящей работе в качестве базовых масел или компонентов смазочных материалов различных типов для производства пластичных смазок, смазочно-охлаждаюших жидкостей (СОЖ), синтетических масел, защитных водовытесняющих составов, технологических смазок и других трибологических продуктов предлагается использовать масла и жиры преимущественно технического назначения, а также не пищевые продукты их химического превращения – сложные эфиры низших спиртов и высших жирных кислот, содержащих C_{16}-C_{18} атомов углерода. Предложены технологические методы и приемы их переработки, включая получение сложноэфирных составляющих, которые рекомендуется использовать в качестве базовых компонентов смазочных материалов для автомобильного и промышленного транспорта.*

Increased attention to environmental problems, limited reserves of oil gas and other solid sources of chemical raw materials (coal, shale, peat), as well as the high cost of synthetic products, make it imperative to find alternative hydrocarbons for the production of lubricants. In the present work, as base oils or components of lubricants of various types for the production of lubricants, lubricants and cooling liquids, synthetic oils, protective water-drying compositions, process lubricants and other tribological products are proposed to use oils and fats of mainly technical use, as well as non-food products of their chemical conversion - esters of lower alcohols and higher fatty acids containing C_{16}-C_{18} carbon atoms. Technological methods and methods of their processing are proposed, including production of ester components, which are recommended to be used as basic components of lubricants for automobile and industrial transport.

Ключевые слова: нефть, газ, возобновляемое сырье, растительные масла, сложные эфиры, смазочные материалы.
Keywords: oil, gas, renewable raw materials, vegetable oils, esters, lubricants.

Повышенное внимание к экологическим проблемам, ограниченность запасов нефти газа и других твердых источников химического сырья (каменный уголь, сланцы, торф), а также высокая стоимость синтетических продуктов вызывают настоятельную необходимость поиска альтернативных углеводородов для производства смазочных материалов [1]. Известно, что таким сырьем могут быть жиры (жидкие и твердые) растительного и животного происхождения [2]. Они обладают высокой биоразлагаемостью, нетоксичностью, а самое главное, являются возобновляемым сырьем, что существенно повышает интерес к ним и их значение на далекую перспективу для развития современных и будущих транспортных систем [3].

В настоящей работе в качестве базовых масел или компонентов смазочных материалов различных типов для производства пластичных смазок, смазочно-охлаждаюших жидкостей (СОЖ), синтетических масел, защитных водовытесняющих составов, технологических смазок и других трибологических продуктов предлагается использовать масла и жиры преимущественно технического назначения, а также не пищевые продукты их химического превращения – сложные эфиры низших спиртов и высших жирных кислот, содержащих C_{16}-C_{18} атомов углерода [4,5,6]. В то же время перспективны соапстоки растительных масел, отходы масло-жировых комбинатов, технический жир бройлерных фабрик, использованные масла после длительной термической обработки картофеля и мяса предприятиями быстрого питания «Киэфси» (KFC), Макдоналдс (McDonalds) и др. [7].

В настоящее время резко возрос интерес к практическому использованию жиров (в основном технических растительных масел) и продуктов их переработки в качестве компонентов смазочных материалов при производстве и эксплуатации электромобилей [8,9].

В Российской Федерации данному вопросу уделяется пока незначительное внимание, объясняемое временным переводом большинства силовых агрегатов на газомоторное топливо, в то время как продукция сельского хозяйства России чрезвычайно востребована зарубежными потребителями, которые решают возникшие у них трудности в продовольственных и энергетических вопросах за счет покупки дешевого и возобновляемого углеводородного сырья из России [10].

Основным препятствием широкому применению масел и жиров в качестве смазочных материалов до недавнего времени являлась их относительно высокая стоимость и низкая термическая, антиокислительная и гидролитическая стабильность [11]. Однако постоянство и возобновляемость сырьевых источников, экономические преимущества по сравнению с биоразлагаемыми синтетическими продуктами (сложные эфиры, и др.) становятся сейчас важнейшими факторами, обуславливающими целесообразность применения жиров в качестве компонентов моторных топлив или самостоятельных смазочных материалов [12].

При использовании жиров в качестве смазочных материалов важны не только их высокая биоразлагаемость, практическая нетоксичность, но и ряд положительных физико-химических и эксплуатационных свойств. Так:

1. По трибологическим свойствам жиры превосходят нефтяные масла, так как высокая смазочная способность сложных эфиров дает возможность ограничить использование химически активных присадок, что существенно увеличивает экологические преимущества жиров [1];

2. Композиции на основе растительных масел характеризуются отличными вязкостно-температурными свойствами [13];

3. Они весьма стабильны при значительных напряжениях сдвига в отличие от нефтяных масел с вязкостными присадками [1];

4. Технические растительные масла и жиры, а также их сложноэфирные производные соответствуют современным нормам на смазочные и гидравлические масла по смазочной способности, защите от коррозии железа и цветных металлов, антипенным, деаэрационным и деэмульгирующим свойствам [14];

5. Положительные результаты были получены при испытании растительных масел в гидравлических системах машин и механизмов лесного хозяйства и стройиндустрии, а также в стационарных промышленных установках (например, при изготовлении древесностружечных плит) [1];

6. Хорошо зарекомендовали себя растительные масла и в строительном, и горнодобывающем оборудовании (в карьерах) в условиях высокой запыленности. При испытаниях этих продуктов в гидравлических системах и редукторах металлообрабатывающей промышленности не наблюдалось существенного роста вязкости и кислотного числа масел. В этом случае растительные масла имеют преимущество перед дорогостоящими биоразлагаемыми синтетическими сложными эфирами, а также перед

попиалкиленгликолями, хорошая водорастворимость которых способствует быстрому проникновению в грунтовые воды [15];

7. Совместимость растительных масел с эластомерами и термопластичными материалами наблюдается до 80 °С (самый распространенный температурный предел применения жиров и их производных). В ряде случаев возникают трудности из-за размягчения клеевых материалов в масляных фильтрах гидравлических установок (вызванного скорее недостаточной термической стабильностью клеев) [16].

Таким образом, достаточный опыт применения растительных масел в сельском хозяйстве, лесной, строительной и ряде других отраслей промышленности подтверждает целесообразность использования продуктов жирового происхождения. Однако, на практике, при замене нефтяных или синтетических масел на растительные следует учитывать то, что при их смешении из-за различной растворимости присадок может наблюдаться частичная или полная коагуляция их из растворов, приводящая к засорению масляных фильтров.

Также, следует отметить, что основным недостатком таких продуктов является, прежде всего, их низкая стабильность в условиях хранения и применения, особенно в условиях высоких температур [17-20].

Плохие низкотемпературные свойства большинства растительных и животных масел, пока еще не удается улучшить варьированием композиций смазочного материала. В этом случае целесообразно ограничение длительности хранения и применения их при низких температурах [21]. По этой причине применение жиров должно ограничиваться их функцией базовых масел взамен нефтяных (или синтетических), причем основная роль должна, очевидно, принадлежать растительным маслам, как более дешевым, доступным и легко возобновляемым [22].

Применение растительных и животных жиров вследствие их сравнительно невысокой антиокислительной и гидролитической стабильности пока ограничено гоночными автомобилями и гидравлическими установками, для которых характерны соответственно кратковременные и незначительные нагрузки [1]. Однако они очень интенсивно применяются в процессах металлообработки, где необходима определенная степень разложения смазочного материала (эмульсии для прокатных станов), а также в двигателях и механизмах без системы смазки. В последнем случае преимущества жиров наиболее очевидны (двухтактные двигатели внутреннего сгорания, цепи и мотопилы, трелевочные тросы в лесной промышленности, открытые редукторы, пневматический инструмент) [20].

Не вызывает сомнения, что благоприятные экологические свойства делают целесообразным расширение областей применения и ассортимента смазочных материалов на основе растительных масел [23]. Например, в открытых узлах сельскохозяйственных, лесозаготовительных и строительных машин и агрегатов можно использовать кальциевые пластичные смазки, приготовленные на основе рапсового масла (температурный диапазон применения от -20 до 80 ^{o}C, хорошие смазочные и защитные свойства) [24]. Возможно применение растительных масел в производстве пластичных смазок, предназначенных для реборд колес и стрелочных переводов на железных дорогах и трамвайных линиях, для смазки кабелей систем подачи в горном оборудовании, узлов подвесных канатных дорог, приводных агрегатов в туннелестроении. Кроме того, соли жирных кислот могут являться хорошими загустителями [25].

При достаточной совместимости жиров с нефтяными или синтетическими маслами (что наблюдается не во всех случаях) возможно изготовление комбинированных смазочных материалов сложного состава (как правило, для специфических целей). Так, для открытых зубчатых передач предложено - масло, стойкое к воздействию влаги, обладающее хорошими антикоррозионными свойствами и работоспособное в широком интервале температур [26].

Жиры широко используются в смазочно-охлаждающих жидкостях (СОЖ) и технологических смазках для металлообработки [27]. На основе растительных масел возможно приготовление консервационных средств для временной зашиты от коррозии [28].

Таким образом, анализ сложившейся ситуации показывает, что в условиях растущего дефицита сырья, проблема вовлечения в технологический цикл возобновляемых и экологически чистых продуктов, образующихся в процессе основных и вспомогательных производств, является все более актуальной. При этом для получения целевых продуктов на основе масло-жирового сырья предпочтительнее разрабатывать технологии, позволяющие использовать это сырье целиком, без дополнительного разделения на отдельные компоненты. В предыдущих работах было показано, что сегодня такими отходами могут явиться отходы масло-жировой, лесохимической и других отраслей промышленности. Хотя большинство их них и содержит в себе широкий набор полезных продуктов, однако используются они сегодня пока еще недостаточно квалифицировано.

По мнению авторов настоящей работы одним из вариантов ресурсо- и энергосберегающей технологии использования масло-жировых отходов является способ их глубокой переработки для полу [29-31].

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что из многообразия способов переработки сырья растительного и животного происхождения к наиболее перспективным следует отнести их химическую переработку. Этот способ позволяет в определенной степени извлекать и использовать, содержащиеся в масло-жировых продуктах полезные вещества. Однако технологическая сложность заключается в том, что большинство промышленных образцов растительных масел и жиров, как правило, состоит из смеси компонентов, различающихся по своему составу, строению и реакционной способности. Поэтому без надежно разработанных и научно обоснованных методов и подходов к химическим процессам переработки вторичного масложирового сырья невозможно осуществление безотходного замкнутого производства.

В настоящей работе предлагается метод и технология переработки масло- и жиросодержащих отходов предприятий быстрого питания, а также технических растительных масел, животных жиров большинства масложировых комбинатов Российской Федерации, которые на сегодняшний день пока еще не нашли достаточно квалифицированного применения в народном хозяйстве.

Проведенные исследования с помощью современных физико-химических методов анализа (тонкослойная, газо-жидкостная, гель-проникающая хроматография, ЯМР-, ИК- и УФ-спектроскопия, химические анализы) показали, что все они состоят из смеси насыщенных и ненасыщенных кислот, содержащих от 10 до 20 и более атомов углерода, а также их производных в виде сложных эфиров глицерина. Вместо традиционных способов высокотемпературной вакуумной разгонки (температура 260 - 320 ^{o}C), для первичной химической переработки отходов жирных кислот в настоящей работе предлагается применять метод их преэтерификации алифатическими спиртами нормального строения при температуре от 70 до 140 ^{o}C в присутствии катализаторов щелочного и кислотного типа. При химической переработке отходов многоатомными спиртами (триметилолпропаном, пентаэритритом) процесс наиболее целесообразно проводить при температуре от 150 до 200 ^{o}C в присутствии гетерогенного катализатора - окиси цинка.

В отличие от традиционных методов высокотемпературного гидролиза триглицеридов растительных масел и животных жиров при температурах 140 - 160 ^{o}C, авторами предложено применять метод алкоголиза алифатическими спиртами нормального строения, из которых наиболее эффективен метиловый спирт. При температуре процесса от 40 до 60 ^{o}C в присутствии катализатора метилата Na наблюдается практически полное химическое превращение триглицеридов жирных кислот в их метиловые эфиры. В выбранных условиях, образующиеся в обоих случаях системы предложено разделять на два слоя - собственно эфиры жирных кислот и продукты, содержащие непрореагировавшие спирты, выделившийся глицерин, реакционную воду и катализатор.

В результате выполненных исследований было установлено, что применение алифатических эфиров жирноненасыщенных кислот для их дальнейшей переработки имеет свои преимущества по сравнению с кислотами.

Во-первых, подавляется реакция декабоксилирования, приводящая к образованию смолистых веществ не способных к дальнейшему превращению. Это позволяет в дальнейшем получать разнообразные химические продукты высокого качества.

Во-вторых, эфиры более устойчивы к окислению и разложению при повышенных температурах в ходе их последующей переработки.

В-третьих, появляется возможность проведения работы с довольно чистыми веществами, так как эфиры можно выделить перегонкой или другим простым методом, поскольку их температура кипения значительно ниже температуры кипения кислот.

Полученные таким образом эфиры жирных кислот могут непосредственно использоваться в качестве товарного или исходного продукта для целого ряда синтезов, а также в виде базовых смазочных материалов. Отходы процессов этерификации и алкоголиза по предлагаемой технологии направляются для извлечения непрореагировавших алифатических спиртов и выделившегося в процессе химического превращения глицерина [29-31].

Установлено, что катализаторы этерификации и алкоголиза можно использовать многократно. Оставшиеся после переработки масляно-кубовые продукты рекомендуются к использованию в приготовлении композиций для получения дорожных покрытий [29-31].
С целью практического воплощения технологических процессов получения разнообразных органических соединений на основе алифатических эфиров жирных кислот были изучены различные энергосберегающие синтезы и направления их дальнейшей переработки [32-34]. Исследованы стадии нитрования и сульфирования [35].

Отработаны процессы омыления и гидролиза. Рассмотрены вопросы синтеза различных моно- и дикарбоновых кислот [36,37]. Подробно изучена термическая димеризация эфиров жирных кислот - первая стадия процесса, позволяющая получать биоразлагаемые димеры, олигомеры и полимеры на основе возобновляемого углеводородного сырья [38-40]. Предложен способ получения индивидуальных эфиров олеиновой и стеариновой кислот, заключающийся в гидрировании метиловых эфиров жирных кислот [41-43].

Разработаны процессы получения высших жирных спиртов на основе эфиров жирных кислот с последующим производством биоразлагаемых ПАВ [44-46]. С помощью современных физико-химических методов анализа установлена структура продуктов окисления алифатических эфиров и получены новые данные о возможности расширения ассортимента моно- и дикарбоновых кислот [47-49]. Проработаны вопросы технологии всех стадий процесса глубокой переработки отходов растительных и животных жиров, в том числе вопросы конструктивного оформления реакционных узлов, регенерации катализаторов, организации рецикла реагентов, разделения продуктов реакции, с последующей проверкой их на лабораторных установках непрерывного действия с последующим использованием их в качестве смазочных компонентов [28-49].

Библиографический список:

1. **Евдокимов, А.Ю.** Экологические аспекты химмотологии смазочных материалов / А.Ю. Евдокимов, И.Г. Фукс, И.Р. Облащикова // М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001, с. 115-116.

2. Достижение науки и техники (Самарская ГСХА) / Г.А. Ленивцев [и др.] // АПК, 2001, №8, с.24-26.

3. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю. Евдокимов [и др.] // М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. - 424 с.6.

4. Перспективы применения углеводородного сырья не нефтяного происхождения для производства топлив и химических продуктов/ В.В. Соловьев [и др.] //Материалы конференции "Перспективы развития химической переработки горючих ископаемых", Санкт-Петербург, «Химиздат» 2006 г. с.287.

5. Комплексная оценка состояния и перспективы развития производства химических веществ и топлив на основе альтернативных источников углеводородного сырья / В.В. Соловьев [и др.] //Материалы конференции "Перспективы развития химической переработки горючих ископаемых", Санкт-Петербург, «Химиздат» 2006 г. с.309.

6. **Соловьев, В.В.** Перспективы создания смазочно-охлаждающей жидкости на жирнокислотной основе/ В.В. Соловьев, В.В. Шеенкова, Е.А. Мисюля //Шестьдесят третья региональная научно-техническая конференция студентов, магистров и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, посвященная 1000-летию Ярославля. 21 апреля 2010 года., Ярославль. Ч.1: Тезисы докладов. - Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2010.- С 50.

7. **Мартиросян, И.Б.** Международная научно-теоретическая конференция «Молодые ученые — пищевой и перерабатывающей отраслям АПК» / И.Б. Мартиросян, Л.В. Зайцева, 1997.: Тез. докл. М., 1997, с.39-40.

8. Смазочные материалы для электромобилей: разработки движутся вперед. Режим доступа https://gulfoilukraine.com/ru/mastylni-materialy-dlia-elektromobiliv-rozrobky-rukhaiutsia-vpered/

9. Технические жидкости для электромобилей: охлаждение и смазка [Электронный ресурс]. Режим доступа:https://info-parts.ru/tekhnicheskij-portal/dvigatel-transmissiya/item/3739-tehnicheskie-zhidkosti-dlya-elektromobiley-ohlazhdenie-i-smazka.html .

10. **Соломонов, А.П.** Развитие мировой нефтепереработки под влиянием структурных изменений в топливно-энергетическом балансе / А.П. Соломонов // Вестник Евразийской науки, 2019 No6. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://esj.today/PDF/33ECVN619.pdf.

11. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. // Под ред. В.М.Школьникова. -М.: Химия, 1999. 432 с.

12. Топлива и смазочные материалы на основе растительных и животных жиров / А.Ю. Евдокимов [и др.] // М., ЦНИИТЭнефтехим, 1992. с. 119.

13. **Сисенда, В.В.** Разработка энергосберегающих масел на смешанной основе для червячных передач. / В.В. Сисенда // Дисс. канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000,- 138 с.

14. **Воробьева, Е.В.** Исследование и разработка экологически улучшенного масла для двухтактных бензиновых двигателей / Е.В. Воробьева // Дисс. канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. 89 с.

15. **Дадашев, М.Н.** Экологически чистая технология получения растительных масел - компонентов моторных смазочных материалов. / М.Н. Дадашев, И.Р. Облащикова // Тезисы материалов технического совещания «Автомобильный транспорт и экология среды», Москва, 1997, с. 13.

16. **Евдокимов, А.Ю.** Возможности использования природных продуктов в производстве смазочных материалов для нефтегазового комплекса / А.Ю. Евдокимов И.Р. Облащикова, Е.Г. Семипядная // Тезисы Всероссийской недели нефти и газа, Москва, 2001, с.96.

17. Влияние высоких температур на сырье растительного и животного происхождения / В.В. Соловьев [и др.] // Наукоемкие химические технологии – 2002 и Реактивы: восьмая междунар. научно-техн. конф., 7-11 октября, Уфа. - С. 58-59.

18. Разработка фундаментальных основ новых экологически чистых, энерго- и ресурсо-сберегающих процессов комплексной переработки промышленных масло-содержащих отходов / Соловьев В.В. [и др.] //Химия и химические продукты: отчетная конф. за 2002 г. / РХТУ им. Д.И. Менделеева- М., 2003. - С. 21-22

19. Разработка фундаментальных основ экологически чистых, энерго- и ресурсосберегающих процессов комплексной переработки промышленных маслосодержащих отходов / В.В. Соловьев [и др.] //Химия и химические продукты: отчетная конф. за 2001 г. / РХТУ им. Д.И. Менделеева. - М., 2002.- С. 18.

20. **Соловьев, В.В.** Методы переработки соапстоков растительных масел и использование продуктов их разложения в промышленности и транспорте / В.В. Соловьев,

Е.Н. Чеснокова, А.С. Куликов //Тез. докл. 59 научн.-технич. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Ярославль, 5 мая 2006 г.- Ярославль.- 2006.- С. 293.

21. **Облащикова, И.Р.** Улучшение термоокислительной стабильности смазочных материалов на основе растительных жиров / И.Р. Облащикова, И.А. Иванов, А.Е. Груздев // Тезисы 5-ой научно-технической конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России», Секция 4, Москва, 2003, с. 31.

22. **Евдокимов, А.Ю.** Смеси масел нефтяного и растительного происхождения как основа для приготовления ПЖС / А.Ю. Евдокимов, И.Р. Облащикова // Сборник научных статей «Транспорт, энергетика, безопасность», Часть 4. - М.: ЦЭТ РАН, 2004. - 53-56 с.

23. **Маньковская, Н.К.** Химия и технология жирового сырья для пластичных смазок / Н.К. Маньковская // М.: Химия, 1976. - 92 с.

24. **Фукс, И.Г.** Пути утилизации отработанных масел и смазок / И.Г. Фукс, А.Ю. Евдокимов, И.Р. Облащикова // «Наука и технологии в промышленности», № 4,2003, с. 74-76.

25. **Вайнштok, В.В.** Научное обоснование, разработка и повышение эффективности производства рабоче-консервационных смазок длительного применения / Вайнштok В.В. // Дис. докт. техн. наук. М.: МИНГ, 1990. -49 с.98.

26. Разработка химического метода и технологии переработки масло- и жиросодержащих отходов / Соловьев В.В. [и др.] //Новая хим. прод.; Технол. изготовл и примен.: науч.-техн. конф., июль 1995. - Пенза, 1995 с. 37-39

27. **Соловьев, В.В.** Разработка биоразлагаемых смазочно-охлаждающих жидкостей / В.В. Соловьев, В.Д. Тихомиров, М.С. Красикова // Юбилейная семидесятая всероссийская научно- техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием "Научно- технические и инженерные разработки - основа решения современных экологических проблем". 19 апреля 2017 г., Ярославль. - Издательский дом ЯГТУ, 2017, Ч. 1, С. 187-192.

28. Разработка технологии получения защитного водовытесняющего состава для предприятий машиностроения / В.В. Соловьев [и др.] // Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 18 апреля 2018 г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 1 [Электронный ресурс]. - Ярославль: Издат. - Номер гос. регистрации обязательного экземпляра электронного издания в Информрегистре, 2018, Ч. 1, С.67-72.

29. Перспектива развития химической переработки возобновляемых углеводородных источников / В.В. Соловьев [и др.] // Материалы конференции "Перспективы развития химической переработки горючих ископаемых", Санкт-Петербург, «Химиздат» 2006 г. с.310.

30. Основы процессов комплексной переработки промышленных маслосодержащих отходов / В.В. Соловьев [и др.] // Статья в монографии «Химические технологии» под ред. П.Д.Саркисова НТП «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» М., 2003 г. с.188-201.

31. Теоретические основы процессов комплексной переработки возобновляемого растительного сырья / Соловьев В.В. [и др.] // Тез. докл. НТПП 203 «Химические технологии». - Москва, 21-22 января 2004 г.- Режим доступа: http://lib.muctr.edu.ru/muctr/sci/ntpp/0106038.doc.

32. **Соловьев, В.В.** Разработка технологии получения консервационных составов для машиностроения / В.В. Соловьев, И.К. Ткаченко, М.С. Красикова //Семьдесят вторая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 24 апреля 2019 г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 1 [Электронный ресурс]. – Ярославль Издат. дом ЯГТУ, 2019. – с.224-228 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

33. **Соловьев, В.В.** Пластификатор на основе рапсового масла для получения эластомерных композиционных материалов / В.В. Соловьев, Н.В. Гасанова, И.М. Волков // Международная научно-практическая конференция, посвященная 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 29 апреля 2019 г., Белгород.: сб. материалов конф. Наукоемкие технологии и

инновации: эл. сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф., Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. – Ч. 10. – с. 120-126.

34. **Соловьев, В.В.** Разработка метода получения смазки на основе полигликолевых эфиров синтетических жирных кислот и олеиновой кислоты для прокатки стальных полос / В.В. Соловьев, И.К. Ткаченко, Д.Р. Погодин //Всероссийская конференция с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» (ПИРХТ-2019), 7 - 9 октября 2019 г, г. Воронеж: Издат. - 2019, с. 111-112.

35. Изучение реакции сульфатирования жирных кислот С18 для получения поверхностно-активных веществ / В.В. Соловьев [и др.] // Химия и хим. технология: Известия вузов. - Иваново.- 2003.- Т. 44, Вып. 9.- С. 121-123.

36. Перспективы обеспечения промышленности алициклическими соединениями, получаемыми на основе возобновляемого растительного сырья / В.В. Соловьев [и др.] // Перспективы развития химии и практического применения алициклических соединений: Тезисы докладов XI Международной научно-технической конференции / ВолгГТУ.- Волгоград 3-6 июня 2008 г.- С. 212.

37. Исследование в области получения эфиров дикарбоновых кислот на основе жирно-ненасыщенных кислот С18 и применение их в качестве сложноэфирных пластификаторов резиновых смесей / В.В. Соловьев [и др.] // 4-я научно-практ. конф. Резинщиков "Сырьё и материалы для резиновой промышленности. Настоящее и будущее", 12-16 мая 1997 г.- М. с.185.

38. Упрощенная математическая модель процесса термической деструкции масложировых составляющих растительных масел и животных жиров, а также их производных / В.В. Соловьев [и др.] // Математика и математическое образование. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. Тр. Вып. 5. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2006 г. с. 196-200.

39. Научные основы синтеза эфиров димерных кислот / В.В. Соловьев [и др.] // Обл. научная конф. студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные проблемы естествознания. Биология. Химия", 17-20 нояб 1997. - Ярославль, С. 22-23.

40. Разработка перспективной химической технологии и новых материалов на основе переработки сырья растительного и животного происхождения / В.В. Соловьев [и др.] // Международная научно-техническая конф. "Перспективные химические технологии и материалы" 27-31 мая 1997. - Пермь с.53.

41. Изучение некоторых кинетических закономерностей реакции гидрирования эфиров жирных кислот C_{18} на Pd- и Ni-катализаторах / В.В. Соловьев [и др.] //2-я научно-техн. конф. "Фарберовские чтения-99"-Ярославль, 1999. -С.28-29.

42. **Соловьев, В.В.** Разработка теоретических основ первичной переработки триглицеридов растительных масел / В.В. Соловьев, А.Л. Комлев // Тез. докл. 58 научн.-технич. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Ярославль, 15 апреля 2005 г.- Ярославль.- 2005.- С. 41.

43. Выбор условий гидрирования метиловых эфиров жирных кислот таллового масла до метилстеарата / Б.Н. Бычков [и др.] //Обл. научная конф. студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные проблемы естествознания. Биология. Химия", 17-20 нояб 1997. - Ярославль, С. 28-29

44. Разработка технологии получения мягкого хозяйственного мыла / Б.Н. Бычков [и др.] // Промышл. нефтехим. Яросл. региона на границе тысячелетий: на науч.-техн. конф. - г. Ярославль, 1994.

45. **Соловьев, В.В.** Синтез и технология получения биоразлагаемых ПАВ для очистки деталей от технологических загрязнений на предприятиях отечественного машиностроения / В.В. Соловьев, А.Е. Головков, Е.А Петрова // Всероссийская конф. с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» - ПИРХТ-2019. 7-8 октября 2019 г., Воронеж: Изд-во ВГУИТ, 2019. – С. 145-146.

46. **Соловьев, В.В.** Разработка процесса получения технологических ПАВ для замены талька в процессе опудривания резино-технических изделий / В.В. Соловьев, Н.В. Гасанова,

Е.Д. Кузнецова // Всероссийская конференция с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» (ПИРХТ-2019), 7 - 9 октября 2019 г, г. Воронеж: Издат. - 2019, 163-164.

47. **Соловьев, В.В.** Исследование возможности проведения процесса этерификации этилового спирта жирными кислотами, выделенными из соапстоков растительных масел/ В.В. Соловьев, Е.А. Клоков // Тез. докл. 60 научн.-технич. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Ярославль, 25 Апреля 2007 г.- Ярославль.- 2007.- С. 275.

48. Жидкофазное окисление жирных кислот С18 и их метиловых эфиров / В.В. Соловьев [и др.] // Химия и хим. технология: Известия вузов.- Иваново.- 2001.- Т. 44, Вып. 6.- С. 130-131.

49. **Соловьев, В.В.** Математическая модель процесса алкоголиза технических растительных масел / В.В. Соловьев, А.Л. Комлев, Е.П. Кубышкин // Математика и математическое образование. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. Тр. Вып. 5. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2006 г. с. 171-175.

УДК 625.122 + 06 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_389

Д.Р. Тагирова (Ростовский государственный университет путей сообщения)

АНАЛИЗ ПАВОДКОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ВБЛИЗИ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ И СПОСОБЫ ИХ МОНИТОРИНГА

Аннотация. *В статье выполнен анализ литературы, в котором были рассмотрены системы мониторинга, их различия и применения, в случаях экстремальных и техногенных паводковых ситуаций.*

The article analyzes the literature in which monitoring systems, their differences and applications in cases of extreme and man-made flood situations were considered.

Ключевые слова: система мониторинга паводковых явлений, центр сбора и обработки данных, мониторинг паводков.
Keywords: flood monitoring system, data collection and processing center, flood monitoring.

Одной из важнейших проблем безопасности движения поездов, является подтапливание инженерных сооружений вблизи рек (рис.1), из-за погодных факторов.

Данную задачу предназначены выполнять инженерные сооружения, а также системы защиты территорий от подтопления. В связи с глобальной проблемой изменения климата, появляются такие факторы как: резко меняющаяся температура, в сочетании с ливневыми осадками, а также направлением скоростью ветра, которые негативно сказываются на состоянии водопропускных, берегоукрепительных и регуляционных сооружениях.

Существуют строительные нормы и правила СП 104.13330.2011 «СНиП 2.06.15-85 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления», в которых прописаны строительные нормы и правила для проектирования систем, объектов и сооружений инженерной защиты от затопления и подтопления территорий.

Развитие автомобильных и железных дорог в равнинных и горных районах, подвергается росту числа разрушительных воздействий природного характера на объекты транспортной инфраструктуры. В статье журнала Гудок описывают проблему обрушений мостов, в связи с паводками на сети железных дорог. Например, в Башкирии наблюдался мощнейший паводок за последние 5 лет, в зоне паводков насчитывается более 20 тысяч человек. [1]

Рис.1. Затопления железнодорожного полотна на Черноморском побережье

Так же, в журнале опубликована статья за 13 августа 2019 г., в которой описан обзор ЧП на железных дорогах России и мира. В связи с наводнением, было прервано железнодорожное сообщение, огромные задержки пассажиров спровоцировали давку на ж/д вокзалах. [2]

Ежегодно в Российской Федерации происходит около 40-70 крупных затоплений. По данным Росгидромета, этим стихийным бедствиям подвержены около 500 тыс. кв. км, наводнениям с катастрофическими последствиями - 150 тыс. кв км, где расположены порядка 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов, более 7 млн га сельхозугодий.

Среднегодовой ущерб от наводнений показан на рис. 2, оценивается примерно в 40 млрд руб., в том числе в бассейнах рек Волга - 9,4 млрд руб., Амур - 6,7 млрд руб., Обь - 4,4 млрд руб., Терек - 3 млрд руб., Дон - 2,6 млрд руб., Кубань - 2,1 млрд руб., Лена - 1,2 млрд руб., озеро Байкал - 0,9 млрд руб., прочих рек - 10,7 млрд руб. [3]

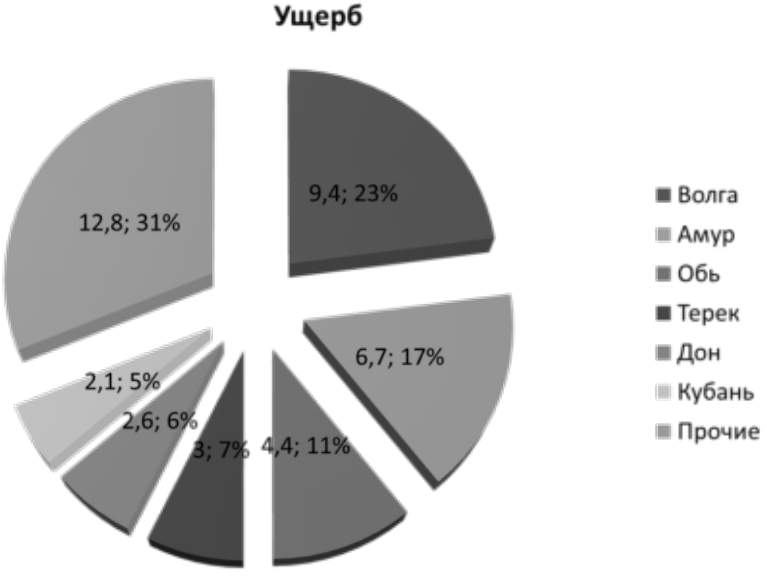


Рис.2. Сравнительная диаграмма среднегодового ущерба от наводнений

Анализируя статистику за прошедшие 2019-2020 г., которая представлена в таблице 1, по данным МЧС, можно сделать вывод, что число случаев чрезвычайных ситуаций увеличилось. Это связано с резко меняющимся климатом. На территории РФ расположено 26257 гидротехнических сооружений, степень износа оценивается от 9 до 88%, при критических значениях износа, требуется система мониторинга

Для возможности решения таких проблем, а также для экономической и безопасной составляющих, предлагаются системы мониторинга паводков. [4]

В настоящее время предлагается множество вариантов систем мониторинга. Для решения этой проблемы были проанализированы следующие документы и статьи.

Для решения поставленной задачи был подписан Указ Президента РФ от 13 ноября 2012 г. № 1522 «О создании комплексной системы экстренного оповещения населения об угрозе возникновения или о возникновении чрезвычайных ситуаций» [5], а также ведомственной целевой программой министерства гражданской обороны, чрезвычайных ситуаций и региональной безопасности Краснодарского края (далее – министерство) «Мониторинг состояния дна, берегов, изменений морфометрических особенностей, состояния водоохранных зон водных объектов или их частей на территории Краснодарского края» на 2011-2013 годы», утвержденной постановлением главы администрации (губернатора) Краснодарского края от 1 июля 2010 г. №519 [6]

Таблица 1

Статистика за 2019-2020 чрезвычайных ситуаций

	2019	2020
Количество случаев	17	29
Погибло, чел	26	0

В статье О.П. Архипкина, Г.Н. Сагатдинова и др., говорится о использовании оперативной системы космического пространства. Для отслеживания паводковых ситуаций и наводнений, используется методика, получающая пространственно- временную динамику зон затопления на указанной территории при развитии паводков и наводнений. [7]

В Башкирии существует государственный цифровой сервис, который имеет название система мониторинга прогнозирования и моделирования гидрологических режимов Паводок 2.0.

Данная программа предоставляет круглогодичный мониторинг уровня воды в стационарных гидропостах ежедневный, в автоматических ежечасный. Автоматический мониторинг метрологической обстановки, с прогнозом на 5 - 14 суток. Также автоматическое краткосрочное и долгосрочное прогнозирование, с помощью нейронных сетей и статистического анализа. Дистанционный мониторинг гидрологической и метеорологической обстановки с использованием космических снимков. Автоматизированный расчет объектов, попадающих в зоны затопления, и маршрутов эвакуации до ближайших пунктов временного размещения людей. [8]

Статья о тенденции роста катастрофических наводнений на территории Российской Федерации, основные характеристики и понятия наводнений, сделаны исторические и географические анализы, а также приведены показатели наводнений и тенденции роста. [9]

Использование данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) для мониторинга паводков и наводнений. Предлагается ежесуточная спутниковая съемка за наблюдением ледохода по рекам на протяженности 500 км, предоставленная система оперативного мониторинга обеспечивает:

1) определение состояния льда, количество, число (площадь) промоин и открытой воды, влагосодержание или обводнение льда, классификация льда, оценка процентного соотношения площади тонкого мокрого льда и толстого заторного льда в заданных сегментах русла;

2) контроль за ледяными заторами, контроль результатов взрывных работ и работы ледоколов по подготовке русла к ледоходу, оценка эффективности принятых мер по спуску льда;
3) динамика развития ледохода и продвижение кромки льда, наличия льда в руслах рукавов, образование ледовых заторов и начало подтопления поймы;
4) оценка территории подтопления и общей площади, залитой водой в заданных сегментах территории; оценка границ максимального распространения воды;
5) оценка инфраструктуры, попавшей в район подтопления, включая дороги, мосты, зоны застройки и населенные пункты, сельхозугодия.[10]

Таким образом, проблема прогнозирования изменения уровня воды в реках является мало изученной, а системы прогнозирования паводковых явлений в горных районах не были предложены.

Поэтому данная проблема отличается новизной и актуальностью, особенно для района Черноморского побережья и регионов Северного Кавказа.

Приведем описание факторов постановки проблемы:

Особые грунтовые условия и сейсмичность – в бассейнах горных рек особую роль играют донные материалы, их во время наводнения бурный поток поднимает со дна, который оказывает дополнительное разрушительное воздействие на искусственные сооружения. Сейсмичность, способствует образованию селевого потока, оказывает негативное воздействие на всю инфраструктуру, которая расположена вблизи русла.

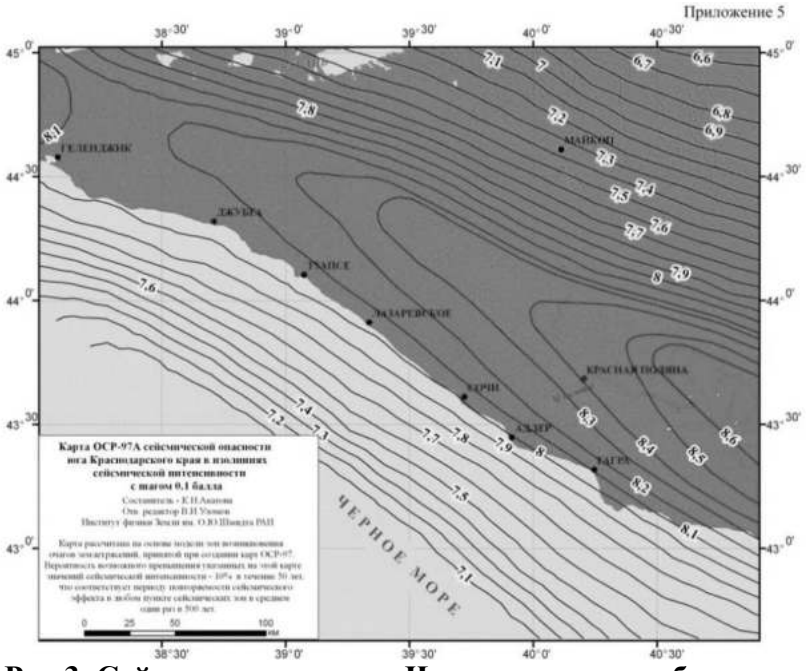


Рис.3. Сейсмическая карта Черноморского побережья

Погодные условия – во время усиленных осадков, играют роли еще второстепенные факторы, такие как ветер, таяние ледников, грунтовые воды, коррозия почвы и т.д. При взаимодействии всех факторов, увеличиваются риски чрезвычайной опасности.

Питание от водохранилищ - водохранилище при увеличении осадков, может наполниться до критической точки, и чаще всего, принимается решение о сбросе, поэтому питающиеся от него реки, моментально получают повышенный выброс воды, который превышает их критичный уровень.

Техногенные особенности – это сосредоточение производств во многих регионах страны, вблизи водных ресурсов. В частности, большое скопление нефтяных, газовых и других полезные ископаемых, находятся на территории Черноморского побережья. Необходимо учитывать все угрозы горных рек, при строительстве производственной инфраструктуры, но при этом из-за изменения климата, даже все учитывающие факторы и риски, могут быть нивелированы.

Таким образом, рассматривая все факторы, можно говорить о необходимости системы мониторинга паводковых явлений, для своевременного реагирования на чрезвычайные ситуации и природных опасностей и техногенных катастроф.

Библиографический список

1. Электронный ресурс https://vgudok.com/lenta/rzhd-spasayut-utopayushchih-ucheniya-i-protivorazmyvochnye-poezda-zheleznye-dorogi-gotovy-k
2. Электронный ресурс https://vgudok.com/lenta/voda-s-potolka-lyotsya-kak-iz-vedra-obzor-chp-na-zheleznyh-dorogah-rossii-i-mira
3. Электронный ресурс https://www.mchs.gov.ru/uploads/document/2021-05-07/2f6a02740e1048c96604666552d7c80a.pdf
4. Электронный ресурс https://investfuture.ru/news/id/7-samyh-sereznyh-pavodkov-i-navodneniy-v-rossii-za-poslednie-gody
5. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году» / - М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021, 264 с.
6. Указ Президента РФ от 13 ноября 2012 г. №1522 «О создании комплексной системы экстренного оповещения населения об угрозе возникновения или о возникновении чрезвычайных ситуаций» // Официальный сайт Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.
7. Постановление главы администрации (губернатора) Краснодарского края от 1 июля 2010 г. №519 «Об утверждении ведомственной целевой программы «Мониторинг состояния дна, берегов, изменений морфометрических особенностей, состояния водоохранных зон водных объектов или их частей на территории Краснодарского края»
8. Электронный ресурс https://portal.ingorist.com/CoGIS/FloodRB
9. Тенденция роста катастрофических наводнений на территории Российской Федерации / Г. М. Нигметов [и др.] // Технологии гражданской безопасности. 2003. №1-2.
10. Электронный ресурс http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=15&table=news
11. Процедура Прогнозирования и Управления Водными Ресурсами и Перераспределения Стока Воды При Прохождении Паводков (2021) //Восточно-Европейский журнал корпоративных технологий, 2(10 (110), 6-17, 2021.
12. **Аттиссо, Д.А.** Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга паводков и наводнений / Д.А. Аттиссо // Наука и молодёжь (2018).99-102
13. Электронный ресурс https://vawilon.ru/statistika-navodnenij-v-rossii
14. **Симонов, В.В.** Природа возникновения наводнений, затоплений и характеристика поражающих факторов / В.В. Симонов, О.В. Осадчий // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2014. №1
15. **Гундоров, Д.Ф.** Особенности системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / Д.Ф. Гундоров, С.О. Потапова // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. №9.
16. Приказ МЧС России от 31.12.2002 г. № 632 «Об утверждении Порядка подготовки, представления прогнозной информации и организации реагирования на прогнозы чрезвычайных ситуаций».
17. Прогнозирование уровня весенних паводков и мониторинг зон затопления на основе ГИС-технологий и систем искусственного интеллекта / В.А. Владимиров [и др.] // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2012. №2.
18. **Костин, А.В.** Цифровая модель рельефа (методы создания и направления использования) / А.В. Костин // Наука и техника в Якутии. 2011. №1 (20).
19. **Денисова, Ю.И.** Построение прогнозной модели зоны затопления пос. Кизнер средствами ГИС-технологий / Ю.И. Денисова, А.А. Перевощиков // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2009. №1.

УДК 621.311 + 006 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_394

С.В. Тищенко (Ростовский государственный университет путей сообщения)

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. *В данной статье рассмотрены основные проблемы функционирования энергетических систем, а также основные направления развития энергетики в России.*

This article discusses the main problems of the functioning of energy systems, as well as the main directions of energy development in Russia.

Ключевые слова: энергия, энергетика, энергосистема, энергосбережение.
Keywords: energy, power engineering, power system, energy saving.

Энергосистема представляет собой комплекс электростанций, электрических и тепловых сетей, а также потребителей электрической и тепловой энергии. Все эти составляющие одного целого связаны набором режимов в непрерывности процессов производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической и тепловой энергии с общим управлением. Электрическая часть энергосистемы называется электроэнергетической системой.

Для решения проблем этой отрасли необходимо использовать инновационные технологии в теплоэнергетике, гидроэнергетике, атомной энергетике, в системах распределения и передачи электроэнергии.

Главной задачей российской энергетики, прежде всего, является принятие правильных решений по совершенствованию, выбору структуры управления в целях обеспечения электроэнергетической безопасности и дальнейшего эффективного функционирования. Последующие этапы развития могут быть осуществлены с помощью современных технологий и новейшего оборудования для перехода на новую технологическую основу [1].

На сегодняшний день можно выделить ряд основных проблем в энергетической отрасли:

– ограниченные объемы инвестиций и их малоэффективное использование приводят к увеличению дефицита производственных мощностей и неудовлетворённости потребительским спросом;

– отставание в разработке и применении новейших технологий для производства и транспортировки электроэнергии из-за отсутствия государственного контроля;

– радикальное повышение тарифов на электроэнергию, что приводит к низкому уровню платежей потребителей за отпускаемую им электрическую энергию и, как следствие, нехватке оборотных средств;

– внедрение ресурсосберегающих технологий и оборудования находится на низком уровне, потери электроэнергии в сетях возросли;

– проблема физического старения оборудования из-за его функционального и экономического износа [2].

Единая электрическая сеть должна быть сформирована из трех составляющих:

– национальной магистральной сети;

– магистральные сети, интегрированные энергосистемы;

– региональные распределительные сети.

В России электроэнергетика является одной из отраслей с наибольшим вкладом в ВВП. В то же время потребление электроэнергии растет во всем мире, и Россия является одним из ведущих экспортеров электроэнергии.

Помимо реальных потребителей, рынок электроэнергии включает в себя три сегмента:

– генерация;

– передача и распределение;

– сбыт [3].

Генерирующие компании производят электроэнергию и поставляют ее на внутренний и внешние рынки. Сбытовые организации закупают электроэнергию на оптовом рынке и продают ее конечным потребителям. Крупные промышленные потребители имеют возможность покупать электроэнергию и мощность непосредственно на Федеральном (общероссийском) оптовом рынке электрической энергии (ФОРЭМ)[1]. А сетевые компании осуществляют передачу электроэнергии от генерирующих объектов потребителям, а также осуществляют технологическое присоединение новых потребителей [4].

С точки зрения частного инвестора, самый большой выбор высококачественных активов доступен в сегменте генерации. Во многом это связано с тем, что электроэнергетика является наиболее ориентированной на рынок в этой части. Также привлекательность этих эмитентов повышается благодаря государственной программе поддержки инвестиций в генерацию.

Электроэнергетика – довольно разнообразная и сложная отрасль экономики. Участие государства оказывает значительное влияние на эту отрасль. Это проявляется как в мерах поддержки, так и, например, в ограничении роста тарифов.

В системах распределения и передачи электроэнергии:

– разработка распределенных интеллектуальных систем и распределенной генерации, которые обеспечат высокотехнологичную и экономическую эффективность, энергетическую независимость и контроль;

– создание проводников с использованием новых композитных материалов, которые позволят увеличить пропускную способность по току, снизить потери в сетях, снизить затраты на строительство линий электропередачи, увеличить срок службы, повысить коррозионную стойкость;

– создание высокотемпературных сверхпроводящих материалов и устройств на их основе: трансформаторов, кабелей, синхронных компенсаторов, ограничителей тока короткого замыкания, двигателей и генераторов, которые позволят сделать электрическую сеть более эффективной и надежной;

– разработка силовых устройств и электроники для управления потоками активной и реактивной мощности с целью поддержания уровня напряжения в электрической сети, повышения стабильности и надежности энергосистем, а также линий электропередачи;

– создание надежных и недорогих накопителей электроэнергии различных типов на всех уровнях: магистральной сети, распределительной сети и конечных потребителей, которые могут существенно повлиять на развитие и режимы работы энергосистемы за счет выравнивания графиков нагрузки и увеличения использования генерирующих мощностей, передающих и распределительных сетей.

Основными задачами по дальнейшему развитию электроэнергетики являются:

– разработка и внедрение новых технологий во всех сферах электроэнергетики;

– подготовка и реализация демонстрационных проектов по созданным технологиям;

– совершенствование структуры генерирующих мощностей;

– модернизация оборудования, развитие технологических инноваций.

---

[1] **Федеральный (общероссийский) оптовый рынок электрической энергии и мощности** (**ФОРЭМ**) — сфера услуг и купли-продажи электрической энергии и мощности, осуществляемой его субъектами в пределах ЕЭС России. ФОРЭМ представляет собой систему договорных отношений множества его участников (субъектов), связанных между собой единством технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии в ЕЭС России

– создание эффективной системы целостного управления развитием и функционированием электроэнергетики страны в целом, позволяющей минимизировать эксплуатационные расходы и тарифы на электроэнергию.

Развитие основной электрической сети должно быть направлено на:

– обеспечение надежной выходной мощности крупных электростанций;

– обеспечение надежности электроснабжения мегаполисов, крупных городов и узлов нагрузки;

– энергетическая поддержка глобальных инфраструктурных проектов по развитию систем поставок нефти, газа, автомобильных и железнодорожных сетей;

– обеспечение реализации системообразующих функций, надежности системы.

Одним из инструментов решения проблем электроэнергетики, на мой взгляд, сейчас является набирающий всероссийскую популярность – энергосервисный контракт.

Если кратко, то механизм заключения энергосервисного контракта выглядит следующим образом: инвестор вкладывает собственные средства в модернизацию освещения – старое оборудование заменяется новым энергоэффективным, модернизируются линии электропередачи, устанавливается «умное» оборудование под названием АСУНО[2], которое контролирует весь дальнейший процесс эксплуатации линий и позволяет значительно, до 70 %, снизить нагрузку на линии электропередач за счёт установки энергоэффективного и ресурсосберегающего оборудования.

Остановимся подробнее на преимуществах заключения энергосервисных контрактов.

Сетевые компании сами по себе предоставляют инвестиционные возможности, на фоне других эмитентов данного сегмента они выделяется своим особым положением как владельца магистральных сетей, так и владельца распределительных региональных сетей, в т.ч. сетей наружного (уличного) освещения [5].

На наружное (уличное) освещение в России ежегодно тратится более 100 млрд. кВт·час, или 12 % всего потребления электроэнергии, из них на уличное освещение расходуется приблизительно 4,5 млрд. кВт·час. В денежном выражении сумма оказывается весьма значительной, при среднем тарифе на электроэнергию в России на нужды наружного (уличного) освещения 8,00 рублей за 1 кВт·час она может превышать 32 млрд. рублей.

Но одной из проблем, как было упомянуто выше, является изношенность и моральное устаревание линий электропередач, которые были построены, зачастую, во бытность Советского союза. Срок эксплуатации вышеупомянутых сетей давно превысил 2-х кратное значение, что приводит к значительным коммерческим потерям при транспортировке электроэнергии.

Ввиду того, что приблизительная доля участия электросетевых компаний в 1 кВт·час для конечного потребителя составляет не более 15 %, то не сложно подсчитать, на какой входящий денежный поток может рассчитывать электросетевая компания, основным видом деятельности которой является именно транспортировка электрической энергии. На этом этапе энергосервисный контракт может стать механизмом для повышения энергоэффективности при ведении основной деятельности электросетевой компании.

При заключении энергосервисного контракта, предметом которого является экономия энергетического ресурса, а не бюджетных средств, сетевая компания в качестве инвестора-исполнителя за счёт внедрения энергосберегающих технологий может перенаправить денежные потоки в виде экономии электроэнергии до 70 %. В итоге, вместо получения 15 % за транспортировку электроэнергии в виде 4,8 млрд. рублей (15 % от потребления наружным (уличным) освещением в России равным 32 млрд. рублей) электросетевая компания может получить в денежном выражении до 20,8 млрд. рублей (70 %) в виде сэкономленной

[2] Автоматизированная система управления наружным освещением

электроэнергии плюс 1,68 млрд. рублей за трафик оставшейся части электроэнергии, потребляемой системой наружного (уличного) освещения.

Расходная часть при реализации энергоэффективных мероприятий:

– масштабная замена энергоёмких потребителей (светильников) на энергоэффективные;

– установка Автоматической системы управления наружным освещением (АСУНО), которая в свою очередь позволят не только обеспечивать нормативное потребление и стабильную работу распределительного сетевого комплекса, но и выявлять несанкционированные подключения и сбои в работе;

– замена устаревших оголённых проводов на самонесущий изолированный провод.

Примерный объём инвестиций при заключении энергосервисного контракта составляет 40–45 %. Увеличив расходную часть до 70-72%, электросетевая компания сможет полноценно произвести замену линий наружного освещения, вплоть до 100 %, при этом входящий оставшийся входящий денежный поток составит более 5,8 млрд. рублей. Таким образом, заключение энергосервисных контрактов при условии масштабной модернизации распределительно сетевого комплекса позволят в горячем остатке сохранить и даже преумножить входящий денежный поток с 4,8 млрд. рублей до 5,8 млрд. рублей.

Помимо всего сказанного выше, энергосберегающие технологии позволяют относительно простыми методами значительно снизить нагрузку на распределительно-сетевой комплекс наружного (уличного) освещения, а излишки электроэнергии, производимой генерацией, направить на увеличение производственных мощностей крупных потребителей и внешние рынки, сдержать рост тарифов, повысить конкурентоспособность экономики, увеличить предложение на рынке труда.

В заключение важно отметить, что организация энергосбережения в национальном масштабе является чрезвычайно сложной и приоритетной задачей. В этот процесс должно быть вовлечено максимальное число участников и большинство организаций. В то же время особое внимание следует уделить внедрению энергосберегающих технологий и применению системы энергосервисных контрактов. Снижение энергопотребления и увеличение пропускной способности систем являются взаимосвязанными аспектами, которые также следует учитывать при планировании энергопотребления.

Библиографический список

1. **Арутюнян, А.А.** Основы энергосбережения: монография / А.А. Арутюнян// М.: Энергосервис, 2014. – 600 с.

2. Оценка экономической эффективности энергосбережения. Теория и практика. М.: Теплоэнергетик, 2015. – 400 с.

3. **Игнатьева, И.А.** Некоторые вопросы практики применения законодательства об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности / И.А. Игнатьева // Закон. – 2015. – № 1. – С. 62–67.

4. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 11.06.2021) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ce9d0946b609c94f3eb8025cefc3b1c70079f979 (дата обращения 25.10.2021).

5. **Корниенко, С.В.** Анализ базовых уровней энергопотребления при оценке энергоэффективности зданий / С.В. Корниенко // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 2. – С. 16–21.

Сборник статей
Международная научная конференция
«Механика и трибология транспортных систем»
(МехТрибоТранс−2021)

Collection of articles
International Scientific Conference
«Mechanics and tribology of transport systems»
(MechTroboTrans −2021)

Статьи приводятся в авторской редакции

The articles are given in the author's edition

Компьютерная верстка А.И. Азоян
Подписано в печать с оригинал-макета
Формат 60х/84/8 Бумага офсетная.
Усл. печ. л. _____ Тираж _____ изд. №_____ Заказ №_____

Computer layout by A.I. Azoyan
Signed in print from the original layout
Format 60x/84/8 Offset paper.
Cond. print. s. _____ Edition _____ Pub. h. No._____ Order No._____

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
Адрес: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д.2

Rostov State Transport University
Address: Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,
Rostov-on-Don, 344038