

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ШЛАПОБЕРСКИЙ АНАТОЛИЙ АНДРЕЕВИЧ

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ХОДОВОЙ
ЧАСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность: **05.22.10** – *Эксплуатация
автомобильного транспорта*

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических
наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
профессор Назаркин Виктор
Гаврилович

Санкт-Петербург- 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ВОССТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	8
1.1. Анализ отказов и условий эксплуатации узлов трения ходовой части	8
1.2. Аналитический обзор способов восстановления деталей транспортных средств	9
1.3. Применение композиционных материалов при восстановлении и ремонте узлов трения ходовой части	18
1.4. Выбор представительной детали, формулирование цели работы и задач исследования ...	25
1.5. Выводы	27
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДВИЖНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ УЗЛОВ ХОДОВОЙ ЧАСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	28
2.1. Теоретические основы математического описания кинематики подвижных сопряжений узлов трения	28
2.2. Теоретические основы причинно-следственных связей технологических факторов и показателей процесса восстановления узлов трения ходовой части транспортных средств ...	30
2.3. Математическая модель процесса формирования узлов трения ходовой части транспортных средств	34
2.3.1. Уравнение модели трения в контактируемых подвижных шкворневых узлах	34
2.3.2. Планирование эксперимента на трение сопрягаемых поверхностей шкворневого узла.	36
2.4. Выводы	46
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	47
3.1. Определение оценочных показателей восстановления деталей узлов трения с использованием композиционных материалов	47
3.2. Исследование микроструктуры изготавливаемого материала	52
3.3. Исследование твердости по длине и толщине покрытия	59
3.4. Исследование твердости по площади покрытия	60
3.5. Исследование пористости покрытия	62
3.6. Исследование коррозионной стойкости испытываемых образцов	64
3.8. Выводы	85
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УЗЛАМ ТРЕНИЯ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	86
4.1. Разработка технологического процесса восстановления узлов трения	86
4.2. Оптимизация параметров технологического процесса и определение технологической себестоимости замены детали	92
4.3. Эксплуатационные испытания сопрягаемых поверхностей	97
4.4. Определение условного ресурса сопряжения	100
4.5. Расчет экономического эффекта от внедрения способа восстановления узлов трения ходовой части транспортных средств изготовлением втулок из композиционных материалов	101
4.6. Выводы	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Ускорение темпа грузоперевозок, ежегодное увеличение стоимости проведения ремонтных работ обуславливают необходимость повышения долговечности автотранспортных средств.

Надежность автопоездов, работающих в тяжелом режиме, является одним из основных показателей, определяющих безопасность транспортировки пассажиров и грузов.

По статистике основными причинами отказов автопоездов являются дефекты элементов их основных механизмов ходовой части.

Недостатками технического решения штатного шкворневого узла автопоездов являются наличие заводских пластиковых или бронзовых вкладышей (втулок), которые в процессе эксплуатации под воздействием консольных знакопеременных ударных нагрузок, изнашиваются и появляются значительные люфты, в результате чего нарушаются углы развала и схождения колес, что приводит к интенсивному износу шин и снижению уровня безопасности движения и управляемости автомобиля.

По рекомендациям официальных дилеров автомобилей, данные узлы при их износе рекомендовано браковать. Однако по технологии заводов - изготовителей их ремонт не предусмотрен, производится замена всего узла.

Одним из способов решения выявленных недостатков является возможность замены изношенных втулок узлов трения ходовой части и изготовление их под ремонтный размер из полиэфиркетона.

Корректность и обоснованность методики расчетов триботехнических сопряжений ходовой части оказывают значительное влияние на их надежность и долговечность.

Таким образом, задача диссертационного исследования, заключающаяся в разработке методики повышения долговечности узлов трения ходовой части автотранспортных средств на основе композиционных материалов, **имеет существенное значение в области обеспечения надежности и безопасности автопоездов, а также является важной научно-практической задачей.**

В работе предлагается новое решение задачи повышения долговечности узлов трения ходовой части транспортных средств, а именно шкворневого узла, путем внедрения технологии их восстановления с применением полимерного композиционного материала – полиэфиркетона.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие методик повышения долговечности подверженных трению узлов и деталей с применением различных материалов внесли А.В. Чичинадзе, В.А. Белый, Д.Н. Гаркунов, В.С. Камбалов, Б.И. Костецкий, В.Г. Назаркин, И.Н. Кравченко, И.В. Крагельский, М.А. Масино и др.. Однако, несмотря на полученные высокие результаты в данной области, вопросы повышения ресурса узлов трения, надежности и обеспечения работоспособности, решены не в полной мере.

Цель диссертационного исследования. Разработать методику повышения долговечности узлов трения ходовой части автотранспортных средств (шкворневых узлов) методом ремонтной детали, путем использования композиционного материала с улучшенными свойствами – полиэфиркетона.

Объект исследования. Подвижные сопряжения ходовой части автопоездов, а именно шкворневой узел ходовой части.

Предмет исследования. Триботехническая система сопряжений узлов трения ходовой части автопоездов.

Задачи исследования:

1. Произвести анализ существующих методик повышения долговечности композиционными материалами, с целью оценки возможности их применения для шкворневых узлов автотранспортных средств;
2. Разработать математическую модель трения подвижных сопряжений узлов ходовой части транспортных средств с помощью полиэфиркетона;
3. Разработать технологический процесс восстановления шкворневых узлов, с применением данного материала- полиэфиркетона;
4. Произвести исследование физико-механических свойств и долговечности заменяемого узла из полиэфиркетона;

5. Произвести расчет экономической эффективности внедрения данного способа восстановления.

6. Разработать методику повышения долговечности шкворневых узлов трения, как совокупность решений вышеперечисленных задач, функционально связанных общей целью.

Научная новизна.

1. Теоретически обоснована и экспериментально доказана адекватность разработанной математической модели узла трения, позволяющего оптимизировать работу триботехнической системы.

2. Установлены теоретические и подтверждены экспериментально зависимости выходных параметров технологического процесса восстановления узлов трения ходовой части с применением композиционных материалов при ремонте деталей автопоездов с эксплуатационными показателями.

3. Проведены исследования по физико-механическим свойствам установленного композиционного материала, вследствие которых было установлено, что заводские материалы, по сравнению с предлагаемым материалом (полиэфиркетон), имеют значительно меньший ресурс работы и как следствие низкую надежность узла трения.

4. Разработана методика оптимизации триботехнической системы сопряжения типа «вал-втулка» на созданном триботехническом комплексе.

Теоретическая значимость заключается в высокой степени соответствия теоретических результатов вычислительного эксперимента с реальными показателями по моделированию каждого из факторов по отдельности на процесс износа, но также и их сочетания с использованием разработанной методики.

Практическая значимость. Разработан перспективный технологический процесс восстановления шкворневых узлов ходовой части и тягово-сцепных устройств грузовых транспортных средств. Путем механической обработки на металлорежущем оборудовании предложены изделия для замены сопрягаемого элемента методом ремонтной детали. Благодаря замене заводского материала на полиэфиркетон был увеличен ресурс сопрягаемых элементов.

Методология и методы диссертационного исследования. В работе использованы как стандартные или широко известные методики, так и современные методы исследования. Оптимизацию системы трения проводили на основе математического планирования эксперимента. Характер закономерностей изнашивания изучали на сопряжении типа «вал-втулка» на разработанном триботехническом комплексе, основанном на базе машины трения 2070 СМТ-1. На базе указанной машины трения было создано устройство для непрерывного измерения износа образцов. По данному устройству получен патент на полезную модель. Исследование микротвердости, влияние нагрузки в контакте и скорости скольжения на структуру поверхности трения и реализацию в сопряжении, исследовали с помощью металлографического анализа на установке Olympus GX51, микротвердомером ПМТ-3 и профилографом ЩП-17. Исследование по эффективности создания регулярного микрорельефа выполнялось методом вибронакатки с помощью виброголовки.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) математическая модель трения подвижных сопряжений узлов ходовой части автотранспортных средств с помощью полиэфиркетона;
- 2) методика теоретических и экспериментальных исследований физико-механических свойств и долговечности заменяемого узла из полиэфиркетона;
- 3) способ непрерывного измерения износа образцов на разработанном триботехническом комплексе на базе машины трения 2070 СМТ-1.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта, п. 16 «Совершенствование методов восстановления деталей, агрегатов и управление авторемонтным производством».

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 2 статьях, входящих в перечень ВАК, в 5 тезисах докладов на научно-практических конференциях. Всего по диссертации опубликовано 9 работ. По теме исследования получен патент на полезную модель (№ 185825).

Структура и объем работы. Диссертационное исследование включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 108 наименований, приложения. Работа состоит из 125 страниц печатного текста, 17 таблиц, 41 рисунка.

Степень достоверности диссертации подтверждается приведенными в работе большим числом экспериментальных исследований и расчетных данных, которые были получены за счет использования методов обработки информации статистическим путем, математического моделирования, компьютерных программ и др. Подтверждением является схожесть полученных результатов теоретических исследований с экспериментальными.

Апробация работы. Основные результаты доложены на 72,73 научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (г. Санкт-Петербург, 2016-2017); 69,71,72 научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Санкт-Петербург, 2016-2019).

Полученные научные результаты и практические рекомендации внедрены: в учебном процессе кафедры «Технической эксплуатации транспортных средств» СПбГАСУ, факультета автомобильного сервиса Университета при МПА ЕврАзЭС, кафедры «Сервиса» Смольного университета, кафедры «Эксплуатации и восстановления вооружения и военной техники» ВА МТО им. А.В.Хрулёва, ООО «Арко-Турс» и СПбГУП Пассажиравтотранс АП №6.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ВОССТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Трение сопровождает человека повсюду. Оно является и благом и рождает многочисленные проблемы. При отсутствии трения человек не смог бы перемещаться, не могли бы работать машины, двигаться поезда. Но трение это и причина огромных энергетических потерь, основная причина разрушения деталей, выхода из строя техники. Огромны расходы на восстановление машин и их деталей, выходящих из строя в результате износа. Более 80% расходов на содержание подвижного состава связано с его ремонтом. Поэтому изучение процессов трения и изнашивания, стремление управлять ими, всегда интересовало человека.

1.1. Анализ отказов и условий эксплуатации узлов трения ходовой части

Ускорение темпа грузоперевозок, ежегодное увеличение стоимости проведения ремонтных работ обуславливают необходимость повышения долговечности узлов трения ходовой части (шкворневых узлов) автотранспортных средств. Корректность и обоснованность методики расчетов триботехнических сопряжений ходовой части оказывают значительное влияние на их надежность и долговечность.

На сегодняшний день существует проблема недостаточной проработки технического решения штатного шкворневого узла автопоездов, втулка которого выполнена из пластика или бронзы. При этом возникает необходимость научно обоснованного определения, как в процессе эксплуатации под воздействием консольных знакопеременных ударных нагрузок шкворневые узлы изнашиваются и появляются значительные люфты, в результате чего нарушаются углы развала и схождения колес, что приводит к интенсивному износу, снижению уровня безопасности движения и управляемости автомобиля.

В качестве объекта исследований выбраны грузовые автомобили марок Scania (P, G, R серий), Volvo (FH, FE, FM серий).

Наблюдения за отказами тягачей, проведенные в промежутке с 1996 года по

2019 год показали, что отказ (около 70%) рулевого управления происходит за счет усиленного износа шкворневых узлов в перечисляемых автомобилях.

Большинство отказов приходится на сопряжения ходовой системы грузовика, таких узлов, как колеса, направляющие, рама, подвеска. При этом, треть из них приходится на шкворневые узлы рулевого управления. В связи с этим, у производителей возникает вопрос, как увеличить долговечность этих узлов.

Явление абразивного изнашивания, являющееся одним из основных причин отказов транспортных средств, возникает при попадании в триботехнические узлы абразивных частиц продуктов износа с дороги размером до 1 мм. Оно активно возникает у тех транспортных средств, которые работают на карьерах и перевозят грузы, в основном, по не асфальтированным дорогам.

Так в таблице 1.1. представлены показатели эффективности использования транспортных средств ООО «Арко-Турс». Показатели, представленные в таблице, взяты из отчетной документации отдела эксплуатации ООО «Арко-Турс», остальные показатели рассчитаны на основе полученных данных [67]. Расчетные данные таблицы 1.1. позволяют констатировать, что эффективность использования автомобилей снизилась.

Таблица 1.1. Показатели эффективности использования транспортных средств ООО «Арко-Турс»

№	Показатели	Способ расчета	2003	2010	2017
1	Среднесписочное количество, ед. (Nep)	-	35	70	110
2	Автомобиле-дни хоз-ве, ед. (Дх)	-	8645	17290	27170
3	Автомобиле-дни в работе, ед. (Др)	-	11498	22995	36135
4	Автомобиле-дни в ремонте, ед. (Дрем)	-	2853	5705	8965
5	Средняя грузоподъемность, тн. (Гпер)	-	20	20,5	21
6	Грузооборот, тыс. ткм. (Го)	-	3450	6700	10280
7	Кэф. технической готовности	$K_{тг}=(Дх-Дрем)/Дх$	0,90	0,92	0,94
8	Кэф. выпуска	$K_{вып}=Др/Дх$	0,88	0,90	0,92
9	Техническая скорость, км/час	$V_{тех}=По/Чнд$	47,2	51,2	57,5

1.2. Аналитический обзор способов восстановления деталей транспортных средств

Продвижению вперед производства автомобильного транспорта при невысокой стоимости перевоза грузов способствует скорость перемещения и

гибкость, что несомненно оказывает влияние на экономическое развитие страны. Одна из самых главных задач автомобильных перевозок, вслед за увеличением показателей надежности, экономичности и долговечности автомобилей — это улучшение их эксплуатационных свойств. Постоянная конкуренция с железнодорожным транспортом побуждает повышать значимость упомянутой задачи.

Явления изнашивания и трения зависят напрямую от долговечности и надежности транспортных средств. Нарушение герметичности, точность сопряженных друг с другом деталей, чрезмерные вибрации, гидравлические и механические удары, все это результат изнашивания. Повышенная температура в сопряжениях, потеря мощности, повышенные затраты топливной энергии, все это результат трения. Изнашивание и трение зависит от друг друга напрямую: изнашивание деталей приводит к увеличению или уменьшению трения и наоборот.

Индивидуальный подход к каждому потребителю в последнее время является ключевой особенностью при изготовлении транспортных средств. За счет этой особенности одна и та же модель автомобиля может быть выпущена в разных модификациях. Это может быть изменение типа двигателя или установка на старое основание нового, форма и окраска кузова и т.д. Однако изменение в изначальной комплектности автомобиля, может повлечь необходимые операции по проверке его работоспособности и контроля изменившихся режимов работы.

Состояние любого транспортного средства в процессе эксплуатации не будет становиться лучше, если его сопровождают постоянные отказы, вследствие ослабления резьбовых соединений, повышенного трения, чрезмерной деформации и т.д. Все детали и изделия, находящиеся в рулевом управлении грузового автомобиля, с ограниченным ресурсом, при его потере влекут за собой изменение основных параметров, показатели производства которых стараются улучшить: расход топлива, изнашивание шин, углы установки колес, плавность хода и т.п.

Увод автомобиля в сторону. Возможные причины: изменение формы одной или нескольких деталей подвески, заклинивание вращающихся элементов или их

чрезмерное трение, разность давления в шинах, смещение осей мостов одного относительно другого, повышенное биение колес.

Посторонние звуки в подвеске. Возможные причины: недостаток смазки в трущихся элементах, ослабление резьбовых соединений, увеличение люфта в подшипниках, критический износ трущихся деталей, изменение формы круглых деталей.

Вибрация на руле. Возможные причины: биение колес и возможная их разбалансировка; изменение формы дисков колес.

Преждевременный износ шин. Возможные причины: повышенное давление воздуха.

Повышенный износ крайних частей протектора шины. Возможные причины: недостаточное давление воздуха в шинах.

Протектор неравномерно изнашивается. Возможные причины: повышенное биение колес; увеличенные зазоры в сопряженных деталях подвески.

Одной из дисциплин по изучению износа и трения в деталях машин является *трибология*. А наукой по изучению повышения износостойкости с помощью применения перспективных и инновационных материалов является триботехника.

Еще с самого начала двадцатого столетия бурное развитие автомобильной промышленности, побудило ученых к изучению дисциплин, связанных с трением. На сегодняшний день трибология является отдельным от всех других направлением. Подготовкой специалистов в области трибологии занимаются практически во всех странах земного шара, с целью достижения экономической выгоды. Полученные знания и опыт в области трибологии позволили обеспечить сокращение затрат на капитальный ремонт и направить вырученные средства на развитие предприятий.

Согласно основам трибологии, поверхности деталей, которые находятся в контакте, никогда не могут быть идеальными и всегда содержат микрорельеф. Причем неровности на одной детали никогда не могут совпадать с другой. Один из основоположников трибологии Ф. Боуден однажды выразился: "Наложение

двух твердых тел одного на другое подобно наложению швейцарских Альп на перевернутые австрийские Альпы - площадь контакта оказывается очень малой". Основным источником трения движения является сопротивление относительно к контактными зонам. При этом сопротивление сдвигу зависит от природы соприкасающихся материалов [13].

Крагельский И.В. выдвинул теорию о том, что коэффициент трения состоит из суммы механической и молекулярной составляющей. Впоследствии, она получила название *молекулярно-механической теории трения*. При упругом контакте составляющую силы трения можно рассчитать с учетом гистерезисных потерь, которые объясняются тем, что упругость более мягкого материала несовершенна.

Во второй половине 70-х годов прошлого века Костецкий Б.И. со своими последователями обобщили в труде «Поверхностная прочность материалов при трении» попытки исследования процессов, возникающих при трении и поверхностном разрушении.

Согласно трудам профессора, Белого В.А., основой триботехники является материаловедение, которое представляет собой связь имеющихся знаний и итоги теоретических анализов в области трибологии. Его научные труды могут послужить отправной точкой для изучения аспектов работы избирательного переноса. Многие материалы в работах профессора могут несколько поменять представление на основные триботехнические пути и механизмы износа и смазки. За последние годы в области триботехники особое внимание уделяется высокопрочным композиционным материалам. В процессах производства высокоточного режущего инструмента применяются ранее малоизученные материалы : тантал, карбиды титана и вольфрама [47].

Набор последовательных операций по приданию изделию первоначальной формы и размеров при нанесении покрытий, не уступающих по составу и качеству аналогичным материалам, называется *восстановлением*. На всей планете насчитывается около четырех десятков способов и более двух сотен подвидов способов восстановления [76].

Основной трудностью ремонтного производства является увеличение качества ремонта автомобилей, наряду с уменьшением его себестоимости. Несмотря на рост цен, дефицитными в критериях рынка остаются запасные части, на приобретение которых выделяется 65-75% затрат в структуре себестоимости капитального ремонта. С помощью квалифицированного выполнения разборочных работ автомобилей и проверки работоспособности деталей, можно добиться сокращения расходов на запасные части, что является основной составляющей на пути к снижению себестоимости ремонта. Так как себестоимость восстановления основной массы деталей не превышает 30-70% цены покупки новых, восстановление и вторичная эксплуатация изношенных деталей является основным резервом в решении задачи. Следует отметить, что затраты металла, материалов и энергии существенно ниже затрат при производстве новых деталей. А это, в свою очередь, позволит решить экологические проблемы, сократить энергетические и материально-сырьевые ресурсы. Таким образом, путем реставрации деталей можно не только снизить себестоимость ремонта машин, но и во многих случаях повысить их качество [76].

Способ восстановления детали — совокупность операций, характеризующая технологический процесс (наплавку, напыление и т.д.).

Метод дополнительной детали. Суть метода состоит в увеличении исходного размера втулки и интегрировании в нее новой втулки с прессовой посадкой. С учетом условий эксплуатации сопряжения, в которое входит восстанавливаемая деталь, в качестве вспомогательных деталей могут быть использованы втулки из стали, композиционных материалов, втулки из цветных металлов. При использовании в работе вышеупомянутого метода необходимо учитывать следующее:

- неравномерный износ восстанавливаемой детали чреват образованием зазора между дополнительной и восстанавливаемой деталью, что в свою очередь приведет к износу повышенной интенсивности;
- изменение формы внутренней поверхности восстанавливаемой детали влечет за собой ряд трудностей, заключающихся в подборе дополнительной

штулки требуемого размера;

- высокий износ или тонкая стенка ремонтируемой штулки может привести к деформации ее поверхности [90].

Восстановление деталей полимерными материалами.

С помощью ремонта деталей полимерными материалами (пластмассами) можно заделывать пробойны и трещины, выравнивать поверхности, склеивать детали, закрывать поры в любых деталях, включая труднодоступные места, герметизировать соединения, наращивать поверхности для обеспечения создания натяга в соединении износостойкого покрытия. В некоторых случаях пластмассы и клеевые составы являются хорошей заменой хромированию и осталиванию, пайке, сварке, или быть единственным средством восстановления деталей [90].

Выделяют две группы пластмасс, используемых в ремонте:

1. терморезактивные (реактопласты) - отвердевают и теряют свои пластические свойства при нагреве, применяются в виде различных композиций в жидком или пастообразном состоянии для герметизации, склеивания, наращивания, заделки пробойн и трещин. Основной составляющей в таких композициях являются смолы [90].
2. термопластические (термопласты) - при нагреве сохраняют свои пластические свойства и не отвердевают. К ним относятся полиамиды П68, АК-7, капрон, кетон и др. Используют для изготовления и наращивания деталей [90].

Жидкие клеевые составы поставляются в готовом виде, удобны в использовании, имеют хорошие диэлектрические свойства. Клей марки БФ - это спиртовые растворы терморезактивных смол. Клей БФ-2 используется для склеивания и наращивания металлических деталей, работающих при температуре 55-85 °С и выше, а БФ-4 применим в случаях, где требуется высокая стойкость к вибрациям и большая эластичность. Для соединения металлов с пластмассами и тканями применяют клей БФ-6. Выполненные этими клеями соединения будут устойчивы по отношению к действию нефтепродуктов и кислот ниже 25%-ной концентрации, к воде и холоду [96].

Клей ВС-ЮТ состоит из раствора синтетических смол в органических

растворителях, устойчив к воде, холоду, нефтепродуктам, огнестоек. В спектр его применения входит наращивание, склеивание различных металлов и неметаллических материалов в любом сочетании. Высокой термостойкостью обладает пленка этого клея. Такие соединения могут выдерживать до 5 ч температуру 200 °С. Может использоваться для приклеивания фрикционных накладок сцепления.

Пастообразные клеевые составы. Для преобразования пасты из тестообразного состояния в необратимое твердое вводится отвердитель. Пластификатор усиливает стойкость пленки к температурным колебаниям, эластичность, ударную вязкость. Для увеличения теплостойкости и механической прочности клеевого состава, снижения усадки и приближения коэффициентов термического расширения пасты и восстанавливаемой детали, добавляются наполнители, которые уменьшают стоимость паст [96].

Порошковые термопласты используются в практике ремонта для нанесения различных покрытий.

Капрон - распространенный термопласт, имеющий хорошие физико-химические свойства, обладающий высокой степенью износостойкости и низким коэффициентом трения, представитель полиамидных смол. Примерная температура плавления равна 220 °С. Термопласт будет иметь повышенную жесткость при установлении температуры ниже нуля. Обладает высокими диэлектрическими свойствами, устойчив к воздействию масел, бензина, ацетона, щелочей. Имеет низкую теплопроводность, в 260-290 раз меньшую, чем металлы, а также высокий коэффициент линейного расширения, в 9 раз больший, чем у стали [97]. Представлен в виде гранул размером 8-9 мм, для размельчения которых используют шаровую мельницу. Измельченную твердую углекислоту («сухой лед») и капроновую крошку засыпают в мельницу. При температуре кипения минус 80 °С капрон приобретает хрупкость и без усилий перемалывается в порошок. Основная область применения включает в себя изготовление разного рода подшипников, шестерен, других деталей, и нанесение декоративных и износостойких покрытий на поверхности из металла.

Термопласт ПФ11-12 - это порошкообразная смесь, температура плавления порошка 220-240 °С. В состав данной смеси входят: 57% поливинилбутиралевои смолы, 20% графита, 20% идитола и 3% уртопина. Этот термопласт используется при газопламенном нанесении покрытий на поверхность деталей с целью наращивания и устранения таких повреждений как: неровности, вмятины, выбоины [89].

Склеивание деталей. Для достижения прочности клеевого соединения деталей следует обратить внимание на качество подготовки склеиваемых поверхностей, площадь соприкосновения двух деталей, уменьшение толщины клеевого слоя, режим термообработки в период отвердевания клеевого шва.

Соединения деталей клеевыми составами имеет свои преимущества: возможность получения герметичных и вибростойких соединений, устойчивых к воздействию нефтепродуктов, отсутствие внутренних напряжений в клеевом шве, допустимость соединения друг с другом разных по своему составу материалов, таких как металлы, фрикционные материалы, пластмассы, ткани и других. Температура, при которой ведется процесс, не должна превышать 200 °С. Невысокая прочность и низкая теплостойкость являются недостатками в вышеописанном процессе [92].

Заделка трещин и пробоин в деталях. Отличительной особенностью технологии процесса заделки пробоин, трещин в разных деталях или ликвидации повреждений кавитационного характера в корпусных деталях от процесса наращивания деталей пастами, является предварительная разделка мест повреждения (рис. 1.1, а).

При разделке трещин, кромки раскрывают под углом 60-90°, просверливая на концах отверстия диаметром 2-3 мм. Для достижения высокой прочности ремонтируемой детали, существует несколько способов: армирование шва по длине металлическими скобами (рис. 1.1, г), просверливание технологических отверстий для установки клеевых заклепок (рис.1.1, в) с определенным шагом; наложение стеклоткани в несколько слоев (рис. 1.1, б).

Согласно установленным правилам восстановления трещин и пробоин, для

толстостенных деталей выполняется двухмиллиметровые отверстия с шагом тридцать миллиметров. Вне зависимости от толщины детали восстанавливаемую поверхность необходимо зачистить и обезжирить. Многокомпонентный полимер и армирующая ткань при заклеивании, должны перекрывать зону разрушения равноудаленно в каждую сторону не менее десяти миллиметров [90].

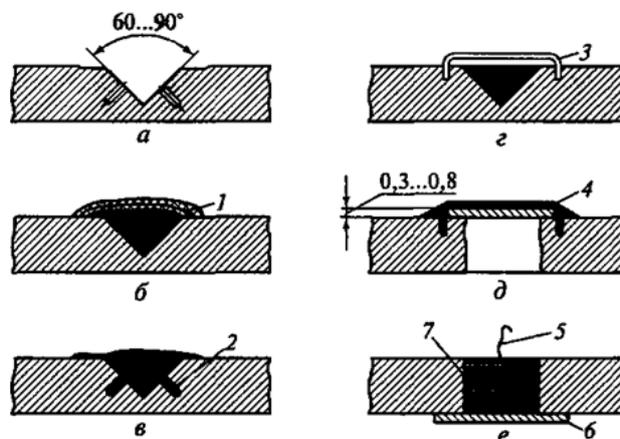


Рисунок. 1.1 Разделка и способы заделывания трещин и пробоин пастами:
 а — разделка трещин; б — усиление шва стеклотканью; в — то же клеевыми заклепками; г — то же скобами; д — заделка пробоины стальной накладкой; е — то же заподлицо; 1 — стеклоткань; 2 — клеевая заклепка; 3 — скоба; 4 — стальная накладка; 5 — проволока; 6 — поддерживающая пластина; 7 — ткань.

На рисунке 1.1, д показано схематичное изображение того, как происходит восстановление пробоин. Перед нанесением стальной заплатки, толщиной примерно 0,5мм, в заранее просверленные отверстия заливают многокомпонентный полимер. Окончательно этот ремонтный узел закрывают несколькими слоями армирующей ткани (угле- или стекловолокна). При заделывании образовавшегося дефекта заподлицо, к восстанавливаемой детали прикрепляют временную пластину, от которой идет леска и заливают полимером с последующей укладкой армирующей ткани. После полимеризации многокомпонентного полимера, временную пластину снимают, остаток лески срезают (рис. 1.1, е).

1.3. Применение композиционных материалов при восстановлении и ремонте узлов трения ходовой части

Композиционные материалы (композиты) представляют собой набор компонентов из матрицы (пластичной основы), армированной наполнителями, характеризующимися жесткостью, высокой прочностью, стойкостью к механическим повреждениям. В результате комбинации веществ, получается новый материал, с количественно и качественно новыми свойствами. Варьируя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентацию наполнителя, получают широкий спектр материалов с требуемым набором характеристик. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам и в то же время они легче. Ввод в состав конструкции композитных материалов, приводит к снижению ее веса и в тоже время к улучшению механических характеристик [54].

С давних времен люди искали возможность повысить прочность и вязкость хрупких материалов с помощью введения различного рода добавок. Так, например, еще в Древнем Египте в кирпичи, для придания им прочности, добавляли солому. Инки при изготовлении керамических изделий использовали растительные волокна, в Англии в штукатурку добавляли волос.

На сегодняшний день самым распространенным композиционным материалом является древесно-стружечная плита (ДСП), матрица которой представляет собой синтетические смолы, наполненные древесными стружками и опилками. Также хорошо зарекомендовал себя железобетон, из которого сооружают масштабные конструкции, выдерживающие большие нагрузки. Именно древние греки первыми стали использовать железо при армировании мрамора. Чтобы пролеты длиной в 5 м справились с напряжениями, архитектор Мнесикл в 440 году до н.э. замуровал в специальных канавках в мраморных плитах двухметровые железные стержни [54].

В состав композитов входят компоненты, содержащие различного рода материалы: пластмассы, металлы, керамику, углерод и другие. Многокомпонентные композиционные материалы могут сочетать в одном

материале несколько матриц или включать в себя разные наполнители. Стойкость к возможным внешним воздействиям, монолитность самого материала, передачу напряжения в наполнителе обеспечивает матрица. От наполнителя зависит жесткость, прочность и деформируемость материала [43].

Структура композиционных материалов. Классификация композитов по структуре: волокнистые, слоистые, дисперсно-упрочненные, упрочненные частицами, нанокompозиты. Волокнистые композиты состоят из волокон или нитевидных кристаллов, содержание которых придает материалу качественно новые механические свойства [49]. Изменение ориентации размера и концентрации волокон также меняет свойства материала. Добавление волокон проводников делает материал электропроводным вдоль заданной оси, а армирование волокнами придает материалу анизотропию свойств.

Матрица и наполнитель в слоистых композиционных материалах представлены слоями. Примером может служить особо прочное стекло, армированное несколькими слоями полимерных пленок [49].

Матрицу других классов композиционных материалов наполняют частицами армирующего вещества, различие состоит в размере данных частиц. Так в составе нанокompозитов размер частиц колеблется от 15 до 95 нм, в дисперсно-упрочненных композитах составляет от 0,02 до 0,2 мкм, а в композитах, упрочненных частицами, размер частиц больше 1,5 мкм [49].

Полимерные композиционные материалы. Композиты, матрицей в которых служит полимерный материал, нашли широкое применение в разных областях. Примером может служить производство космической и авиационной техники, где использование ПКМ дает возможность сэкономить до 30% веса летательного аппарата, что в свою очередь выгодно и с экономической точки зрения [56].

А) Стеклопластики — это полимерные композиционные материалы, являющиеся продуктом формовки расплавленного неорганического стекла с включением стеклянных волокон. За основу берутся термореактивные синтетические смолы и термопластичные полимеры, отличающиеся высокими

электроизоляционными свойствами, низкой теплопроводностью, высокой прочностью, прозрачны для радиоволн. Впервые стеклопластики нашли свое применение в середине сороковых годов XX века в производстве антенных обтекателей. Для нейтрализации дефектов хрупкой матрицы, в первые армированные стеклопластики вводилось небольшое количество волокон. Впоследствии, матрица стала выполнять другую функцию, заключающуюся в соединении прочных волокон между собой, основная масса которых может достигать более 3/4 от массы изделия. Стеклотекстолит - слоистый материал, в котором в качестве наполнителя применяется ткань, плетенная из стеклянных волокон [49]. Благодаря низкой стоимости, стеклопластики используются во многих отраслях промышленности: в радиоэлектронике, судостроении, строительстве и т.д. [49].

Б) *Углепластики* - представляют полимерный композит, основным наполнителем которого являются углеродные волокна, получаемые из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д [49].

Для производства волокон с высоким содержанием углерода, используется несколько этапов термической обработки волокон: окисление — 230° С, карбонизация — 1100-1600° С, графитизация — 1700-3100° С. Структура углеволокна зависит от исходного сырья и режима обработки [49].

Использование одинаковых матриц для изготовления стекло- и углепластиков делает их особо привлекательными для производителей, в большинстве случаев используются термореактивные и термопластичные полимеры [49]. Сравнительный анализ вышеупомянутых углепластиков позволяет увидеть следующее: углепластики обладают более высоким пределом упругости, низкой плотностью, прочностью, маловесны. В число отличительных показателей углепластиков также входит электропроводность, практически нулевой коэффициент линейного расширения, коррозионная стойкость, чувствительность к точечным ударам, сложность утилизации и повторного использования.

Наиболее термостойкие углеграфитовые композиционные материалы (углеуглепластики) создают на основе углеродных волокон и углеродной матрицы. Они характеризуются длительной способностью выдерживать очень высокие температурные режимы (до 3100°C) в инертных или восстановительных средах. Изготовить материалы такого типа можно разными способами. Первый предполагает пропитку углеродных волокон фенолформальдегидной смолой, далее волокна подвергают воздействию очень высоких температур, результатом деятельности которых является пиролиз органических веществ и образование углерода. Данный процесс многократно повторяют для придания материалу более высокой плотности и меньшей пористости.

Второй способ получения углеродного материала заключается в прокаливании графита при высоких температурах в атмосфере метана. При пиролизе метана образовывается мелкодисперсный углерод, закрывающий все поры в составе графита. Плотность графита при этом в 1,6 раза меньше плотности получаемого материала [64].

Область применения углепластиков: машиностроение, ракетостроение, авиация, судостроение, станкостроение, нефтяная и газовая промышленность, металлургия, производство космической техники, в железнодорожном транспорте, для изготовления медицинской техники [56].

В) *Боропластики* - композиционные материалы, наполнителем которых являются борные волокна в виде моноплетей, жгутов, обвитых вспомогательной стеклянной нитью или лент, в которых борные нити переплетены с другими нитями. Борные волокна вводятся в термореактивную полимерную матрицу [49]. Получаемый материал имеет высокие показатели по прочности, жёсткости, выносливости, устойчивости к агрессивным условиям, тепло- и электропроводности. Уровень рабочих температур и ресурс эксплуатации изделий определяются термостойкостью связующего. В связи с трудоемкостью процесса получения борных волокон, стоимость их производства весьма велика, что ограничивает возможность их широкого применения [64].

Боропластики используются в авиационной и космической технике в деталях, подвергающихся длительным нагрузкам в условиях агрессивной среды, что позволяет уменьшить вес конструкции, увеличить её жёсткость и повысить эксплуатационную надёжность изделия [49].

Г) *Органопластики* - композиты, наполнителями которых являются органические синтетические, природные и искусственные волокна в виде разного рода материалов: нитей, жгутов, тканей, бумаги и других. Матрицей в терморезактивных органопластиках являются эпоксидные, полиэфирные и фенольные смолы и полиимиды. Наполнитель, в данном случае, составляет почти половину материала, в то время как, в органопластиках на основе термопластичных полимеров — полиэтилена, ПВХ, полиуретана и других — варьируется в диапазоне — от 2 до 70%. Отличительные особенности органопластиков: легче стекло- и углепластиков, относительно высокая прочность при растяжении, низкая плотность, высокое сопротивление удару и динамическим нагрузкам, низкая прочность при сжатии и изгибе [49].

Степень ориентации макромолекул наполнителя является основной составляющей в повышении механических характеристик органопластика. В большинстве случаев, макромолекулы жесткоцепных полимеров, подобных полипарафенилтерефталамиду (кевлару) ориентированы в направлении оси полотна, следствием этого является их высокая прочность при растяжении вдоль волокон. Органопластики применяют в качестве обшивочного материала, из них производят детали оболочковой формы из-за технологичности при операциях намотки. Монолитность структуры обеспечивает высокое сопротивление ударным и циклическим нагрузкам, высокую вибростойкость. Из материалов, армированных кевларом, изготавливают средства индивидуальной бронезащиты [49].

Свое применение органопластики нашли в отраслях, где требуется особая прочность и легкость: в машиностроении, автомобилестроении, авиа- и космической технике, радиоэлектронике и других [49].

Д) Порошковые полимеры. Данные полимеры были изобретены в первой

половине двадцатого века американским ученым. В состав первого порошкового материала – бакелита, входила древесная мука и полимер, которые находились под давлением до полного наступления кристаллизации. На сегодняшний день известно более тысячи активно используемых разновидностей и наполнителей для данных полимеров. Ассортимент применяемых наполнителей огромен. Например: крахмал используется как составляющий элемент биоразлагающихся композитов; сажа является составляющей полиэтилена, резиновых изделий полистерола; тальк, нитрид бора, двуокись титана, алюминиевая пудра добавляются в терморезактивные смолы (повышается теплостойкость и модуль упругости) [9].

Е) Текстолиты. Материалы, изобретенные в начале 20 века, представляют собой многослойные полимеры на основе фенолформальдегидной смолы, армированной различными тканями. Поначалу текстолитами покрывали столы, далее их область применения значительно выросла и появилась возможность создавать объемные детали. Состав материалов, из которых состоят текстолиты, также увеличился за счет термоактивных и реактивных полимеров и разнообразных тканевых наполнителей [64].

Композиционные материалы с металлической матрицей. Такие материалы формируются из матрицы (медь, алюминий, сталь) и наполнителя (волокна обладающие стойкостью к температуре и высоким нагрузкам на растяжение). Стойкость к высоким нагрузкам и температуре достигается при добавлении 1/10 от общей массы материалов армирующих наполнителей на основе бора, натрия, калия и т.д. Добавление в состав материалов порошков на основе оксида циркония и тория, дает возможность продолжительно работать при температуре от тысячи градусов по Цельсию и выше.

Введение в материал методом армирования волокон (бора, углерода, натрия и др.), обладающих различными химическими свойствами, позволяют увеличить температурную стойкость детали на 30% и выше.

Применение пластичных наполнителей при содержании в материале керамических компонентов, позволяет сделать деталь более устойчивой к

разрушению. Такие наполнители интегрируются в материал различными методами, но с обязательной процедурой спекания: пропитывание волокон, объединение порошком, электроосаждение и др.

Еще один метод, изобретенный во второй половине 20 века, способный повысить стойкость к температуре и разрушению - это армирование материалов монокристаллами в виде нитей, толщиной не более 40 мкм. В основу монокристаллов могут быть положены оксиды вольфрама, молибдена, бериллия, алюминия и др. Этот метод широко распространен в космической и ювелирной промышленности [55].

Керметы. Разновидность волокон, которые можно применить для упрочнения керамических изделий не велик. Это объясняется химическими свойствами керамики. Однако, применив пригодные для работы волокна (например, металлические, за счет низкого роста сопротивления к растяжению), можно добиться высокопрочного композитного материала. Керамико-металлические полимеры, или сокращенно, керметы обладают высокой температурной стойкостью. Эти полимеры получают при спекании под высоким давлением и используются в тех отраслях промышленности, где необходима высокая устойчивость к температуре, резким тепловым ударам и износостойкость при трении [64].

Полиэфирэфиркетон (PEEK). Семейство материалов KETRON PEEK основано на полиэфирэфиркетоновой смоле. Этот современный полукристаллический материал обеспечивает уникальную комбинацию высоких механических свойств, термостойкости и отличной химической стойкости.

Основные характеристики:

- очень высокая максимально допустимая рабочая температура на воздухе (250°C при постоянном воздействии и до 310°C при кратковременном воздействии);
- устойчивость к различным видам излучений;
- материал обладает низкой горючестью;
- устойчивость к реактивам;

- низкие значения коэффициента трения;
- устойчивость к усадке и высокие прочностные характеристики при работе, даже при температурах, близких к плавлению материала.

Нередко полиэфиркетон используют вместо металлических сплавов, поскольку он способен к выдерживанию высоких нагрузок, связанных с явлениями трения и износа.

Добавление тефлона (PTFE), графита и углеродных волокон дает "Подшипниковую Марку" КЕТРОНА РЕЕК. Его отличные типологические качества (низкое трение, долговечность на износ, высокие пределы критерия Давление-Скорость) делают эту марку идеальным материалом для применений, где существенны износ и трение.

1.4. Выбор представительной детали, формулирование цели работы и задач исследования

Так как втулки шкворневых узлов имеют высокие показатели износа, то они и были выбраны в качестве исследуемых объектов автомобилей Scania R серии и Volvo FE серии. Следует отметить, что в данных транспортных средствах присутствует немало втулок, которые можно восстанавливать методом ремонтной детали с заменой заводского материала (пластик, бронза) на композиционный материал.

По рекомендациям официальных дилеров автомобилей шкворневые узлы после достижения неработоспособного состояния подлежат замене. При этом производители данных узлов не выпускают отдельно втулки, поэтому существует возможность только полной замены элемента (шкворневой узел автомобиля Volvo FE серии - 20 000 рублей, для автомобиля Scania R серии - 25 000 рублей - прайс дилеров за сентябрь 2019 года). Заменяя только втулку, можно получить экономию более четырех килограммов (масса шкворня) металла, что относится к технологиям ресурсосбережения. За счет применения подобной технологии, можно сохранить значительную денежную сумму для предприятия, которая эквивалентна шестнадцати килограммам стали только с одного транспортного

средства. Подобных узлов в автомобиле существует еще достаточное количество.



Рисунок. 1.2. Шкворневой узел автомобиля Scania R серии



Рисунок. 1.3. Шкворневой узел автомобиля Volvo FE серии

Повышение ресурса автопоездов за счет увеличения долговечности узлов трения ходовой части (шкворневых узлов), путем разработки способа восстановления при помощи композиционного материала с улучшенными свойствами полиэфиркетона – является целью данной работы.

В соответствии с поставленной целью, можно определить следующие задачи диссертационного исследования:

1. проанализировать состояние вопроса восстановления шкворневых узлов композиционными материалами;
2. построить математическую модель процесса восстановления узлов трения ходовой части транспортных средств с помощью полиэфиркетона;
3. разработать технологический процесс восстановления шкворневых узлов с применением данного материала - полиэфиркетона;
4. произвести исследование физико-механических свойств и долговечности заменяемого узла из полиэфиркетона;
5. произвести расчет экономической эффективности внедрения данного способа восстановления.

1.5. Выводы

1) Руководствуясь выполненным обзором путей увеличения продолжительности работы узлов трения ходовой части автопоездов выявлено, что применение современных композиционных материалов является наиболее перспективным направлением повышения их эффективности использования при ремонтном производстве.

2) Рассмотрены основные труды ученых, занимающихся вопросами трибологии и триботехники. Приведено несколько выдержек из наиболее выдающихся трудов. В данных научных дисциплинах все шире применяют высокопрочные материалы керамики, тугоплавкие соединения на основе переходных металлов, композиционные материалы.

3) Ремонт деталей полимерными материалами (пластмассами) и композиционными материалами прост, экономичен и надежен в их эксплуатации.

4) Анализ отказов и условий эксплуатации узлов трения ходовой части показал, что треть из них приходится на шкворневые узлы рулевого управления. В связи с этим, у производителей возникает вопрос, как увеличить долговечность этих узлов. Восстановление данного узла методом ремонтной детали значительно уменьшит количество отказов рулевого управления автопоездов.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДВИЖНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ УЗЛОВ ХОДОВОЙ ЧАСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

2.1. Теоретические основы математического описания кинематики подвижных сопряжений узлов трения

Поверхностный слой является связующим элементом окружающей среды со структурой тела. Он имеет свойства мембраны (является проводником механических и тепловых воздействий) и твердого тела, имеющего объем (способность к сохранению в нем тепловой энергии), если рассматривать поверхностный слой с точки зрения термодинамики.

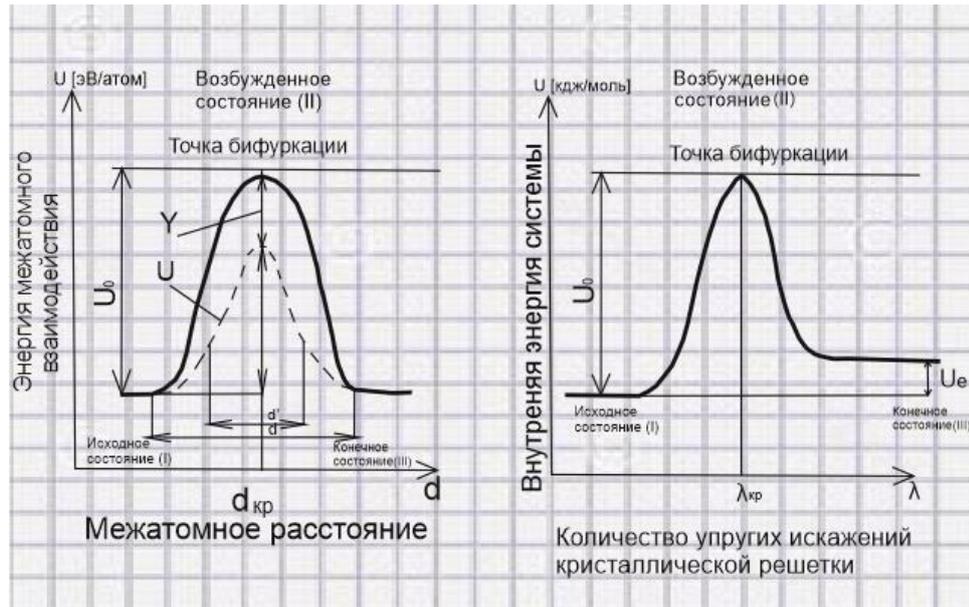
Внутренняя энергия это один из основных параметров термодинамической системы. Энергия носит аддитивную функцию, она может быть определена суммой всех энергий, которые находятся в массе тела.

Зачастую нарушение состояния внутренней энергии, которое обладает характером компенсатора, вызывает каждый процесс, который хоть как-то поучаствовал в системе. При этом, любая система стремится к неизменному состоянию. Как пример можно привести следующую ситуацию: чтобы восстановить первоначальную форму, материалу необходимо запастись определенным количеством энергии, которая будет стремиться к минимуму, чтобы достичь устойчивого состояния. Поэтому происходит максимальное уменьшение энергии системы за счет активации механизмов (теплоотвода, возвращение геометрических размеров кристаллической решетки и т.д.) происходящей самопроизвольно.

При потере устойчивости и превышении значений границ внутренней энергии, система может уже не вернуться в исходное состояние. Такой процесс носит название кинетического (пластическая деформация, диффузия, адсорбция и т.д.), а координата на графике при которой происходит переход системы в неустойчивое состояние из устойчивого - точкой бифуркации.

На рисунке 2.1. изображена диаграмма перехода материала из неустойчивого состояния в устойчивое и наоборот. На диаграмме можно увидеть

схематичное изображение явления изнашивания поверхностей трущихся деталей.



(I) – устойчивость, - неустойчивость (II) - устойчивость (III):
 d - среднее межатомное расстояние; d' - межатомное расстояние под действием внешней нагрузки; λ - параметр повреждаемости; U_0 - энергия активации процесса;
 $U(\sigma)$ - эффективная энергия активации; U_e - запасенная энергия решетки;
 $\gamma\sigma$ - механическая работа по растяжению межатомной связи

Рисунок. 2.1 Энергетическая диаграмма кинетических переходов из устойчивого состояния в неустойчивое

С точки зрения физики, к определению энергии активации можно подойти с разных сторон:

1. Один из подходов сформулирован английским ученым Р.Беккером, который предположил, что энергия активации - это изотермическая работа, направленная на приведение в действие изучаемого процесса;

2. Следующий подход, предложенный американскими химиками-теоретиками Г.Эйрингом и В.Кауцманом, полагается на теорию абсолютных скоростей реакций, по которой невозвратное состояние потенциала системы численно равняется энергии активации. По мнению ученых, частица вернется в первоначальное состояние для освоения границ энергии активации в случае, если значения температурного отклонения энергии будет недостаточно. Исходя из этого, совершение работы по растяжению связи между исходным и возбужденным состояниями, носит обратимый характер.

На макроуровне, численное значение возрастания термодинамического

потенциала приравнивается к выполняемой работе по изменению единицы объема. При этом, возрастание плотности дислокаций влечет за собой процесс пластической деформации. Согласно рисунку 2.1. (б) возрастание плотности упругих искажений прямо пропорционально увеличению внутренней энергии материала по причине накопления дислокаций в объеме тела.

3. Заключительный подход представляет собой совокупность первого и второго, и является актуальным для объяснения того, как образуются процессы, далекие от термодинамического равновесия на этапах, предшествующих разрушению. При этом, при переходе в энергию неупорядоченных процессов, важную роль играют фрагменты тела, находящиеся на мезоскопическом уровне. Суть подхода заключается в следующем: за счет работы, которая направлена выведение частиц из состояния покоя, повышение энергии на каком-то из уровней (макро- или мезо-) является определяющим параметром энергии активации, что приводит к возникновению явления пластической деформации.

2.2. Теоретические основы причинно-следственных связей технологических факторов и показателей процесса восстановления узлов трения ходовой части транспортных средств

При рассмотрении рисунка 2.1, было выявлено, что усталость материала можно разделить на: исходное состояние (поверхностный слой готов к работе), возбужденное состояние (устойчивость утрачивается) и устойчивое состояние (кинетический цикл завершается). При удалении из зоны, где действуют напряжения активизированных веществ, явления разрушения и деформации завершаются.

Целый ряд внешних факторов, которые воздействуют на материал, определяют активацию механизмов, которые, в свою очередь работающие на микроуровне, оказывают влияние на разрушение и деформацию материалов. На процесс разрушения и деформации наиболее часто влияют: энергия активации разрушения, химическая активность сред, температура материала и его поверхностное напряжение.

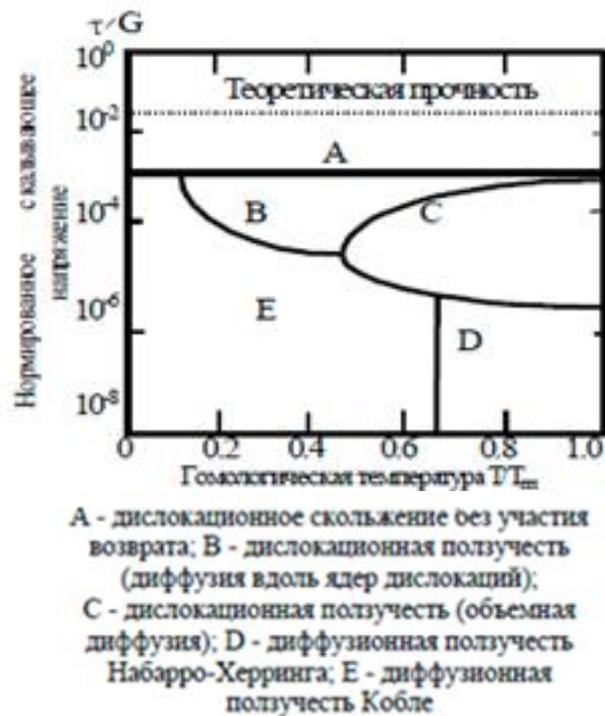


Рисунок. 2.2 Пример деформационной карты чистой меди

В поверхностном слое материала можно выделить несколько факторов того, как на него влияет чувствительный коэффициент материала и энергия разрушения (U_0) (рисунок. 2.2):

1. Возможность оценки активационных характеристик становится доступной только при проведении экспериментальных исследований, так как все известные теории упругости и прочее не могут приняты, поскольку у поверхностного слоя наблюдается анизотропия материала вместе с его неоднородностью. Вследствие этого, после приработки на поверхностном слое материала образуются практически все виды дефектов.

2. На глубине около 2 мкм, когда происходит трение в поверхностном слое материала, образуются повреждения – debris слой. По этой причине, границы проведения исследования должны иметь строгие рамки, но в тоже время, обладать максимально возможным охватом, для придания измерениям высокой точности.

3. При проведении исследований необходимо соблюдать нагрузки, которые оказываются при режиме трения в реальных условиях. Это возможно при придании образцам напряженно деформированного состояния. Также, эти

нагрузки должны иметь одинаковый потенциал с усилиями, которые действуют на образцы при трении во время проведения эксперимента. Это условие является обязательным, так как от направления усилия зависят прочность поверхностного слоя материала и возможная его деформация.

4. При проведении эксперимента, необходимо обеспечить условия для действия микромеханизма повреждения, от которого зависят структурно-чувствительный коэффициент и энергия активации.

Руководствуясь теорией Журкова С.Н. и вышеописанными факторами, модель энергии активации разрушения будет выглядеть следующим образом:

$$U_0 = 2,3 \cdot R \cdot T \cdot \lg \left(\frac{\tau_p}{\tau_0} \right) + \sigma \gamma \pm \Delta G, \quad \text{где} \quad (2.1)$$

R- газовая постоянная;

T- температура в зоне разрушения;

G- результат взаимодействия окружающей среды с поверхностным слоем;

τ_p - долговечность материала; τ_0 - постоянная времени.

В зависимости от количества механизмов процесса разрушения прямо пропорционально будет формироваться численное значение энергий разрушения. При одновременном воздействии, но с разными значениями механические, термические и химические факторы могут послужить толчком к потере устойчивого состояния в материале - деформации. На практике происходит выбор того механизма, который приведет к разрушению материала вследствие образования усталости и пластической деформации, которые объясняются существенной величиной сдвига кристаллической решетки у поверхностного слоя. В конечном итоге, выбранный механизм должен обладать самым низким значением энергии активации, но при этом сохранять устойчивое состояние до образования разрушения атомарных связей. Отличительной особенностью данного механизма разрушения является то, что он проявляется при достаточно высоких внешних напряжениях и сохраняет устойчивость вплоть до появления атермических разрывов межатомных связей. При выполнении всех

вышеперечисленных условий, можно будет применить метод механической активации, чтобы количественно оценить энергию разрушения материала.

В случае схожести численных значений нагрузок при испытаниях на сжатие и растяжение с реальными нагрузками на материал, может быть выполнено оценивание параметров разрушения при механической активации. Это можно объяснить максимально возможными значениями времени и скорости разрушения при воздействии предельно допустимых нагрузок, которые в свою очередь, могут вызвать разрушение и изменение формы материала.

Процесс разрушения можно принять как атермический в случае, если первое слагаемое энергии активации (2.1) будет стремиться к нулю, так как фактор времени будет отсутствовать. При этом, если второе слагаемое обладает механической природой, то смысл механической работы приобретает механическая энергия, что отражено в выражении (2.2) [6].

$$A = \iiint_V \sigma dV = \int F_L dL. \quad (2.2)$$

где q - структурно-чувствительный коэффициент, dV - работа напряжений, затраченная на пластическое отеснение элементарного объема, dL - работа сил по перемещению частиц материала на элементарном пути.

Работу сил по перемещению на пути dL мельчайших частиц материала можно охарактеризовать как энергию активации при механическом возбуждении.

Исследования показали, что наиболее подходящим способом для освоения параметров активации материала, а также за счет регулярного осуществления деформирующих воздействий, запускающих процесс усталости с малым циклом, является механический способ, побуждающий к разрушению поверхностного слоя материала [27].

2.3. Математическая модель процесса формирования узлов трения ходовой части транспортных средств

2.3.1. Уравнение модели трения в контактируемых подвижных шкворневых узлах

Динамика перемещения управляемых колес во многом зависит от степени износа трущихся деталей в шкворневых узлах. Если рассматривать определение силы трения с математической точки зрения, то ее можно выразить в виде функции от скорости с которой перемещается шкворень и давления внутри втулки и шкворня. При этом, сила трения $F_{тр}$ может быть численно равна силе Штрибека. В свою очередь кулоновская сила является суммой $F_{тр\ покая}$ и F , пропорциональной совокупности двух давлений. Совокупность сил Штрибека и кулоновской силы можно объединить в силу страгивания, которая выражена формулой (2.3) [6].

$$F_{тр} = \begin{cases} F_C \cdot (1 + (K_{brk} - 1) \cdot e^{-c_v |v_{nгр}|}) \cdot \text{sign}(v_{nгр}) + f_{vfr} \cdot v_{nгр} & \text{при } |v_{nгр}| \geq v_0 \\ K \cdot v_{nгр} & \text{при } |v_{nгр}| < v_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

где: F_C - кулоновское трение, K_{brk} - коэффициент изменения силы страгивания, c_v - коэффициент, характеризующий интенсивность спада силы страгивания, f_{vfr} - коэффициент вязкого трения.

Кулоновское трение определяется по следующей зависимости [6]:

$$F_C = F_{pr} + f_{cfr} \cdot (p_A + p_B) \quad (2.4)$$

Коэффициент кулоновского трения зависит от вязкости консистентной смазки по следующей зависимости [6]:

$$f_c = A_r \cdot p^{\frac{2}{3}} \cdot v^{-0.4} \mu^{\frac{1}{6}} + A_{ж} \cdot p^{\frac{1}{2}} \cdot v^{\frac{1}{2}} \cdot \mu^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

где: μ – коэффициент динамической вязкость жидкости.

Область линейной модели трения вводится для сглаживания разрыва функции при нулевой скорости [6].

Результаты экспериментальных исследований шкворневых узлов свидетельствуют о том, что в некоторых случаях может наблюдаться нестационарность работы втулок шкворня [6] .

Схематичное изображение уплотнения шкворневого узла, применяемого в конструкции рулевого управления показано на рис. 2.3.

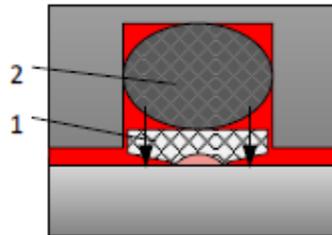


Рисунок 2.3 Схема уплотнения в неподвижном состоянии.

1- Скользящий элемент (втулка); 2- нажимной элемент (шкворень).

При контактном давлении наступает пластическая деформация, и контактная поверхность уплотнения шкворневого узла принимает форму поверхности контртела. При относительном перемещении благодаря конусной части уплотнения, интенсивно создаётся плёнка гидродинамической смазки (см. рис. 2.4.), которая вызывает частичную разгрузку основного уплотнительного элемента, снижая трение [6] .

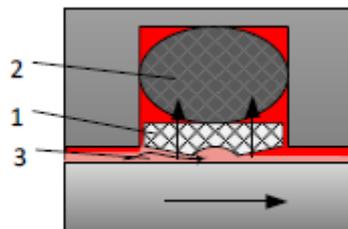


Рисунок 2.4 Схема уплотнения в относительном движении.

1- Скользящий элемент (втулка); 2- нажимной элемент (шкворень); 3- консистентная смазка.

Для уточнения математической модели трения, в качестве гипотезы было принято, что нестационарность в характеристике трения может быть вызвана неравномерностью работы шкворневого узла. Предполагается, что шкворневые узлы работают по аperiодическому закону с определённой постоянной времени. Коэффициенты трения выбираются по результатам испытаний при малых

скоростях относительного перемещения. Постоянная времени выбирается по результатам испытаний при больших частотах [6].

Таким образом, выводится уравнение, описывающее работу шкворневого узла [6]:

$$\frac{dF_{\text{тр}}^{\text{НС}}}{dt} = \frac{1}{T_{\text{упл}}} \cdot (F_{\text{тр}} - F_{\text{тр}}^{\text{НС}}) \quad (2.6.)$$

Где $F_{\text{тр}}$ - сила страгивания, t - время работы уплотнения, $F_{\text{тр}}^{\text{НС}}$ - сила трения с учетом динамики работы уплотнений, $T_{\text{упл}}$ - постоянная времени.

На основании уравнения (2.6.) спланированы и проведены эксперименты.

2.3.2. Планирование эксперимента на трение сопрягаемых поверхностей шкворневого узла

На сегодняшний день шкворневой узел принято относить к элементам рулевого управления транспортных средств. В состав узла входят установленный на верхнем и нижнем шкворнях шаровой опоры поворотный кулак и крышки, при этом каждый шкворень состоит из двух деталей: детали со сферической выемкой и чашки шаровой опоры, которые контактируют между собой посредством самого шара. Недостатками известного технического решения являются наличие полиамидного или бронзового вкладышей, которые в процессе эксплуатации под воздействием консольных знакопеременных ударных нагрузок от тормозного момента и моментов поперечных сил, действующих на колесо и поворотный кулак, сопряженные с шкворнем поверхности вкладышей, чашки и сферы, конусной части самого шкворня изнашиваются и появляются значительные люфты, в результате чего, нарушается угол развала и схождения колес, что приводит к интенсивному износу шин и снижению уровня безопасности движения транспортного средства [44].

Для планирования математического эксперимента необходимо определить, как будет температура и сила трения в зависимости от времени влиять на материал. Для проведения эксперимента были составлены графики зависимостей, изображенных на рисунке 2.5. для заводской бронзовой втулки (БР ОЦС 5-7-12) и полиэфиркетона по остальной поверхности.

При работе бронзовой втулки по осталеной поверхности устойчивое состояние наступает только к 16 минуте эксперимента. Резкие перепады значений коэффициента трения характеризуются определенным временем приработки сопряжения.

Анализируя работу полиэфиркетоновой втулки по стальному шкворню можно констатировать следующее: пористость материала из-за попадания продуктов износа повышается, что побуждает к образованию переходных зон. Из-за этого происходит увеличение коэффициента трения и температуры в течение первого временного промежутка опыта. Из графиков на рисунке 2.5. видно, как происходит снижение показателей, последующая стабилизация температуры и коэффициента трения. При взаимодействии рассматриваемых материалов могут наблюдаться следующие процессы:

- при износе трущихся поверхностей, будут сниматься окисные пленки, что приведет к увеличению поверхностной активности материалов;
- в зонах касания поверхностей деталей, происходит накопление и диспергирование частиц износа.

При этом, чем выше поверхностная энергия, тем больше будет дисперсность частиц износа. Это происходит за счет увеличения толщин защитной пленки и адсорбируемых частиц, так как Важную роль в снижении трения играет размер частиц износа. Чем больше дисперсность, тем большей поверхностной энергией обладает масса частиц износа. Большая поверхностная энергия обеспечивает большую плотность адсорбции частиц на контактируемых поверхностях и, соответственно, большую прочность защитной пленки [83]. Чтобы произвести исследование на анализ взаимодействия двух рассматриваемых материалов, был использован металлографический микроскоп (рис. 2.6.).

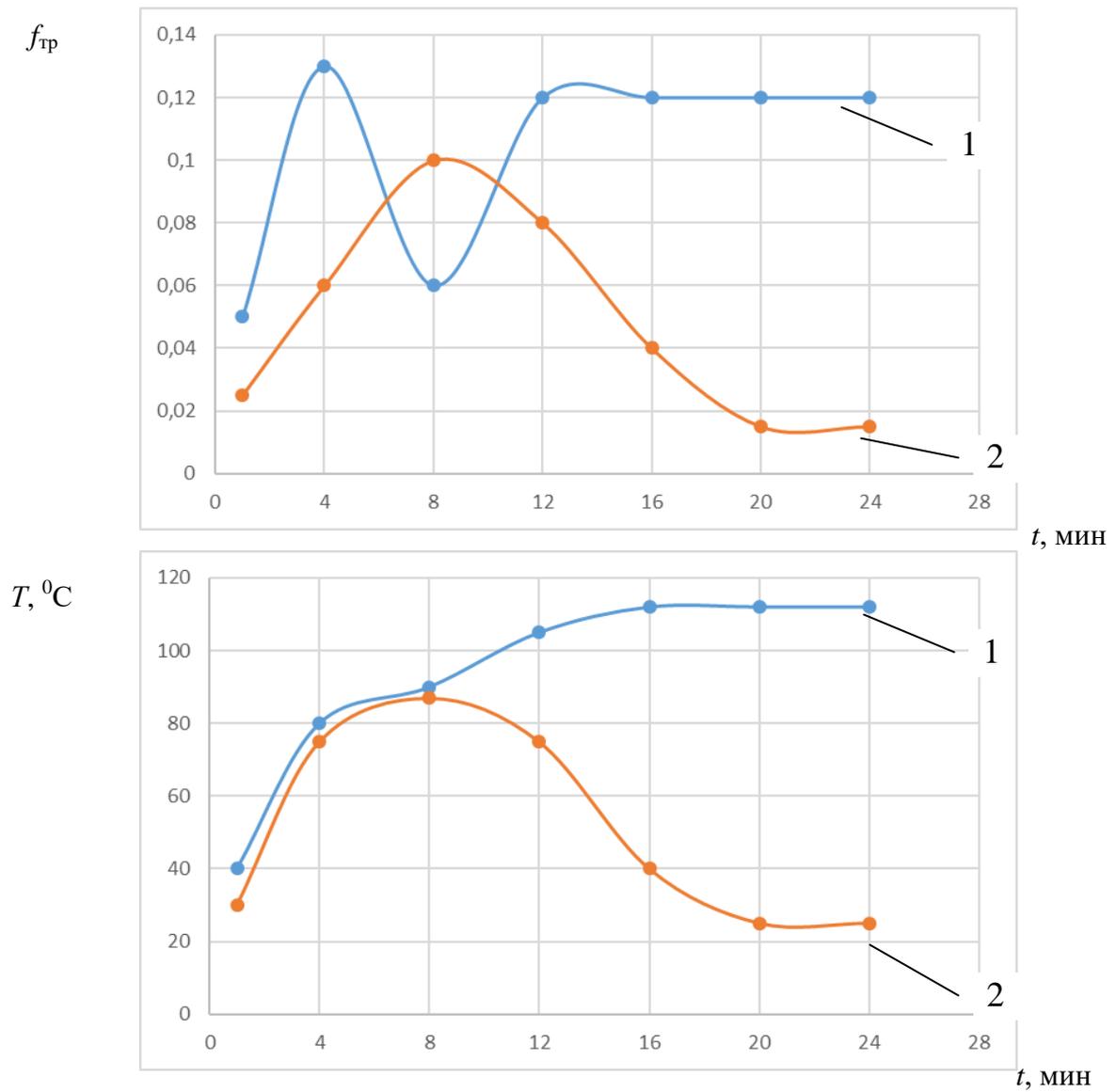


Рисунок 2.5 Изменение триботехнических характеристик при трении Бр ОЦС 5-7-12 (1) и полиэфиркетона(2) по стальной поверхности.



Рисунок 2.6 Микроскоп Olympus GX52

Рисунок 2.7 отображает, как выглядит поверхностный слой образца из стали

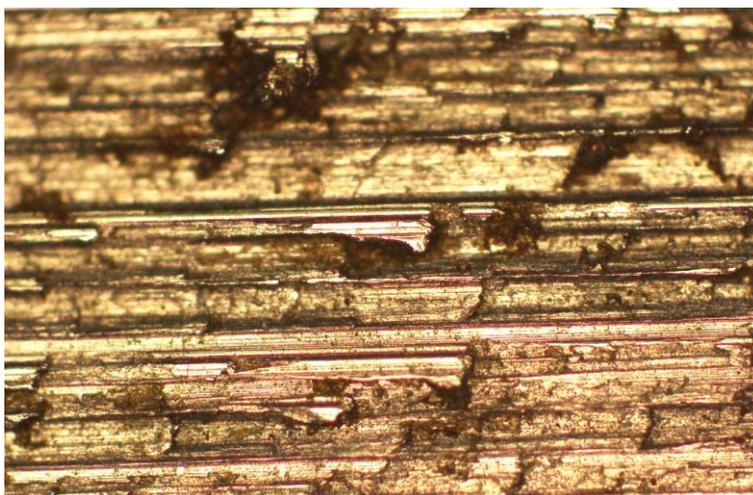
при взаимодействии с бронзовой (рисунок 2.7 а) и с полиэфиркетоновой (рисунок 2.7 б) втулкой при разной кратности увеличения микроскопа.

Анализируя изображения на рисунках, можно сделать вывод: так как значение энергии адсорбирующего воздействия меньше кинетической, происходит удаление крупных по размеру частиц износа. При этом, частицы мелкого размера образуют защитную пленку и остаются на поверхности. Происходит значительная пластическая деформация, в результате которой снимаются поверхностные слои и окисные пленки материала.

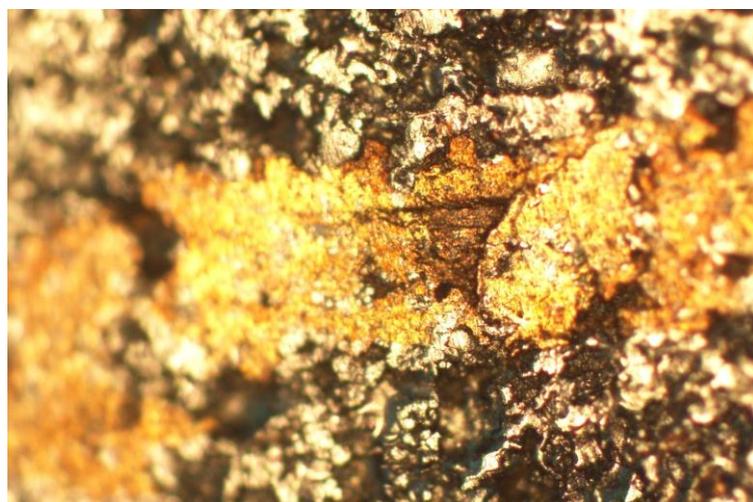
Рисунок 2.8 показывает, как выглядит поверхностный слой стального образца при активации режима пониженного износа.

Согласно рисунку 2.8, образование окисной пленки происходит в местах, где фиксируются максимальные значения поверхностной энергии. Там наблюдается поверхность с дроблением своей структуры. При этом пленка носит прерывистый характер и не может быть образована искусственно.

При работе соединения в режиме пониженного трения на выбор области нагрузок оказывает влияние поверхностная энергия. Так, на графиках (рисунок 2.9) приведена зависимость триботехнических характеристик при трении бронзы и полиэфиркетона по стальной поверхности от нагрузки в трибоконтате [83]. Исходя из построенных графиков, можно увидеть, что нагрузочные режимы работы находятся в пределах от 12 до 16 МПа, остальные значения это приработка трущихся поверхностей. Смещение диапазона пониженного трения для полиэфиркетона в направлении более высоких удельных нагрузок, объясняется почти чем на 30 процентов, относительно меди, меньшей поверхностной энергией. Кроме этого, происходит уменьшение области реализации пониженного трения из-за влияния энергии на прочность защитной пленки.

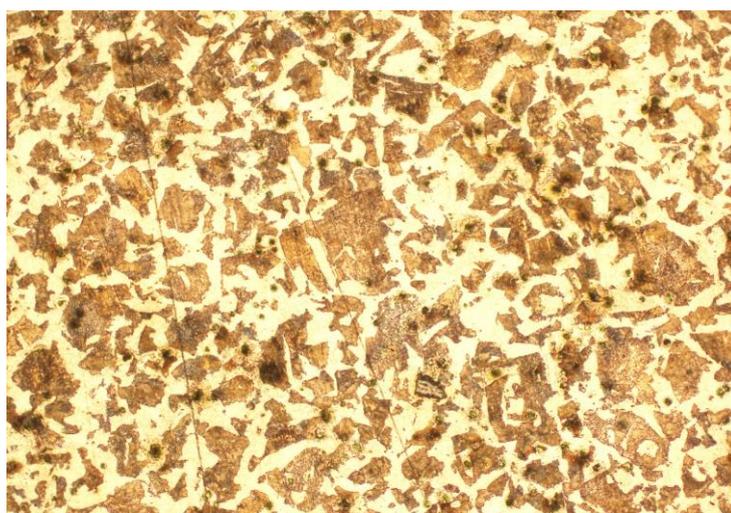


а) при взаимодействии с Бр ОЦС 5-7-12



б) при взаимодействии с полиэфиркетоном. Увеличение: х 1000

Рисунок 2.7 Поверхностный слой образца из стали



Увеличение: х 1000

Рисунок 2.8 Поверхностный слой стального образца при активации режима пониженного износа

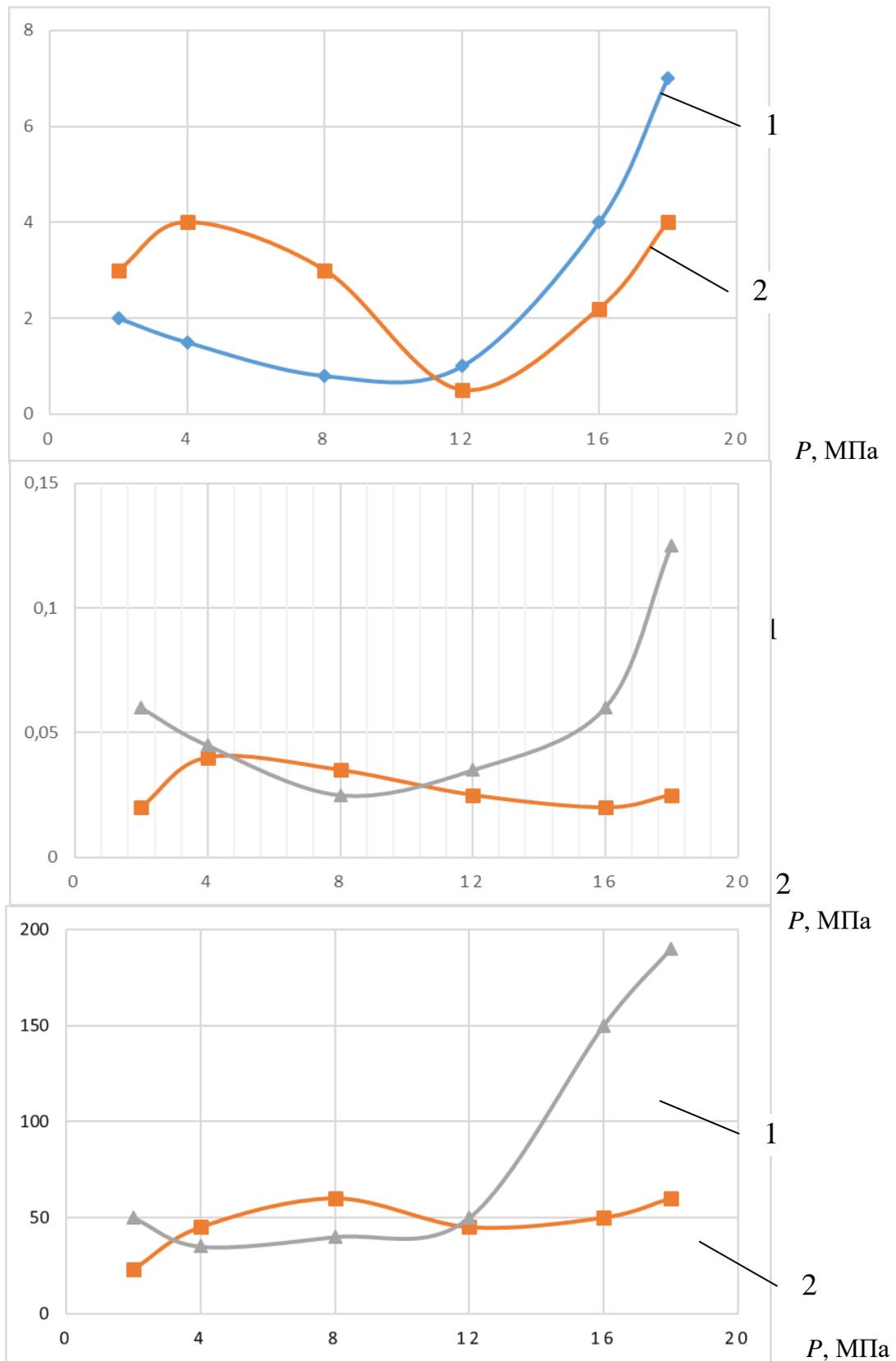
$J \cdot 10^{-6}$,
 МКМ/М


Рисунок 2.9 Зависимость триботехнических характеристик при трении **Бр** ОЦС 5-7-12(1) и **полиэфиркетона(2)** по стальной поверхности от нагрузки в трибоконтakte.

Гипотеза образования на поверхности трения защитной пленки дает вывод, что режим пониженного трения имеет место быть, когда он ограничен областями давлений. Режим пониженного трения будет наблюдаться при условии, когда количество частиц износа будет достаточным на поверхностном слое материала. Размером частиц износа, активностью поверхностного слоя и прочностью характеризуется максимальное значение выносливости защитной пленки.

На основании выдвинутой гипотезы, в процессе исследования структурно-энергетического механизма, было выявлено, что базовым процессом для образования защитной пленки является работа силы трения (2.7):

$$A = f_{np} \cdot N \cdot V_{ck} \cdot t, \quad (2.7)$$

где A -работа сил трения, Дж, N –сила взаимодействия поверхностей трения, V_{ck} – относительная скорость скольжения поверхностей трения, t - время взаимодействия поверхностей трения, с.

К ним относятся: нагрузка в трибоконтакте, время взаимодействия поверхностей трения и скорости скольжения.

Энергия поверхностей трения является определяющим фактором при образовании плотной защитной пленки и структурным преобразованиям системы трения [83].

Для того, чтобы построить зависимости характеристик трения от факторов на них влияющих, были проведены однофакторные эксперименты на триботехническом комплексе, основанном на базе машины трения. К сравнению были выбраны полиэфиркетон и бронза, из которой сделана заводская втулка. Материалы работали в паре со стальным роликом.

По полученным данным были построены графики зависимости давления от интенсивности изнашивания, коэффициента трения и температуры, при различных скоростях скольжения. Энергетический подход к узлу является верным, так как при увеличении скорости скольжения область минимальных числовых значений стремится к нулю, а давление между контактируемыми деталями оказывает влияние на характеристики трения выбранного материала.

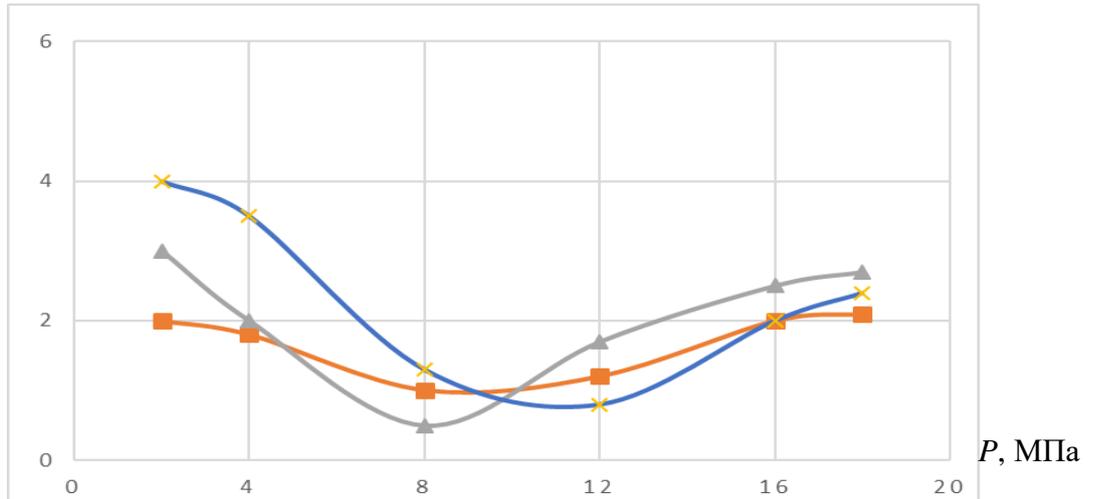
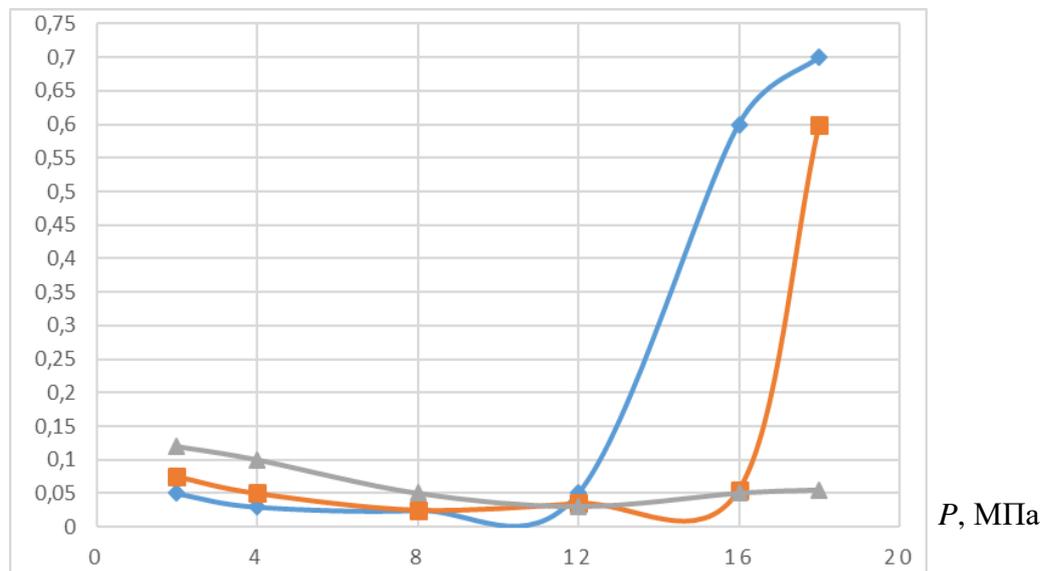
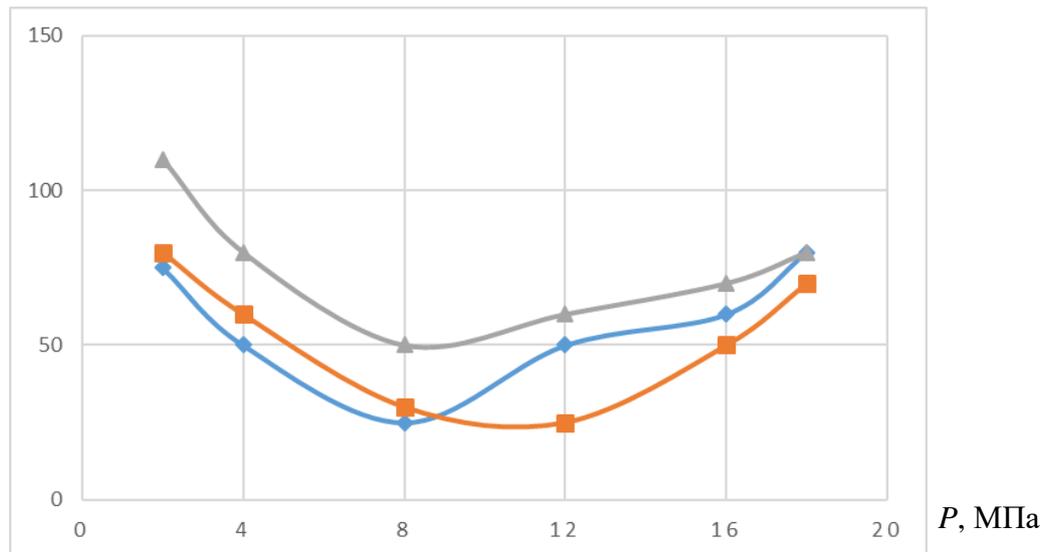
$J \cdot 10^{-6}$,
 МКМ/М

 $f_{\text{тр}}$

 $T, ^\circ\text{C}$


Рисунок 2.10 График зависимости давления от интенсивности изнашивания, коэффициента трения и температуры при различных скоростях скольжения.

 $V_{\text{ск}}=0,5\text{м/мин}$; $V_{\text{ск}}=1,5\text{м/мин}$; $V_{\text{ск}}=2,5\text{м/мин}$

Из анализа зависимостей видно, что при превышении определенного диапазона значения интенсивности изнашивания в зависимости от применения полиэфиркетона увеличивается изнашивание узла. Из других графиков также видно, что значение температуры и коэффициента трения снижается с применением полиэфиркетона.

В итоге был выполнен полно факторный эксперимент второго порядка, чтобы оценить, как влияет каждый фактор (Т - время выдержки, Р – давление на шкворень; $t^{\circ}\text{C}$ - температура в узле) и все вместе на скорость износа триботехнического сопряжения.

В таблицах 2.1 и 2.2 представлены граничные условия факторов, выбранные с учетом технологических ограничений по давлению Р и параметрам сопряжения температуре сопряжения $t^{\circ}\text{C}$ и времени выдержки Т.

Таблица 2.1 Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровни факторов	Обозначение	Р, МПа	Т, час	$t^{\circ}\text{C}$
Основной	0	300	3	175
Интервал варьирования	X	50	1	75
Верхний	+	350	4	115
Нижний	-	250	2	100
Звездные точки	+a	371,5	4,86	397*
	-a	228,5	1,57	78

*При достижении указанного температурного значения, произошло оплавление материала, и проведение эксперимента было окончено.

Таблица 2.2 Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровни факторов	Обозначение	X1	X2	X3
Основной	0	1	1	1
Интервал варьирования	X	0,17	0,33	0,07
Верхний	+	1,7	1,33	1,07
Нижний	-	0,83	0,67	0,93
Звездные точки	+a	1,42	1,62	1,3
	-a	0,65	0,53	0,73

Матрица планирования эксперимента 2 вида abc, bc, b, ac, c, ab, a, b², c² (результаты эксперимента приведены в таблице)

Проверка однородности дисперсии была проведена при помощи критерия Кохрена [83]. Для нашего случая $\alpha = 0,05$ (табл. 2.3.) а $G=0,20$

Таблица 2.3 Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний

№	P, МПа	τ , час	t, °C	I_1 , мкм/час	I_2 , мкм/час	I_3 , мкм/час	$I_{\text{сред}}$, мкм/час
1	-	-	-	0,0150	0,0146	0,0154	0,0150
2	-	-	+	0,0073	0,0079	0,0091	0,0081
3	-	+	-	0,0107	0,0101	0,0098	0,0102
4	-	+	+	0,0061	0,0061	0,0055	0,0059
5	+	-	-	0,0122	0,0143	0,0155	0,0140
6	+	-	+	0,0074	0,0066	0,0070	0,0070
7	+	+	-	0,0101	0,0106	0,0069	0,0092
8	+	+	+	0,0047	0,0051	0,0046	0,0048
9	0	0	-a	0,0148	0,0146	0,0174	0,0156
10	0	0	+a	0,0101	0,0099	0,0097	0,0099
11	0	-a	0	0,0129	0,0124	0,0125	0,0126
12	0	+a	0	0,0089	0,0094	0,0084	0,0089
13	-a	0	0	0,0120	0,0116	0,0106	0,0114
14	+a	0	0	0,0076	0,0080	0,0138	0,0098
15	0	0	0	0,0102	0,0102	0,0108	0,0104

В результате исследований, расчет которых производился в программе MathCad, износ триботехнического соединения с полиэфиркетоновой втулкой будет равен:

$$V_{\text{изн}}=0,009 \text{ мкм/час}$$

Согласно полученному численному значению скорости изнашивания, можно сделать вывод, что применение полиэфиркетоновой втулки позволило увеличить износостойкость сопряжения более чем в 1,5 раза относительно заводской бронзовой втулки.

На основании планирования эксперимента проведены исследовательские испытания, изложенные в главе № 3.

2.4.Выводы

1) При проведении исследований, было выявлено, что усталость материала можно разделить на: исходное состояние (поверхностный слой готов к работе), возбужденное состояние (устойчивость утрачивается) и устойчивое состояние (кинетический цикл завершается). При удалении из зоны, где действуют напряжения активизированных веществ, явления разрушения и деформации завершаются.

2) Для изучения поверхностного слоя материала, а именно его характеристик, оптимальным выбором является способ активации деформации механическим путем, так как он соответствует всем требованиям верного решения при возобновлении процессов трения.

3) Уточнена математическая модель трения, где в качестве гипотезы было принято, что нестационарность в характеристике трения может быть вызвана неравномерностью работы шкворневого узла, а уравнение, описывающее работу шкворневого узла, может записываться в виде формулы Коши [105].

4) Выполнен полно факторный эксперимент второго порядка, чтобы оценить как влияет каждый фактор (T - время выдержки, P – давление на шкворень; $t^{\circ}C$ - температура в узле) и все вместе на скорость износа триботехнического сопряжения. Согласно полученному численному значению скорости изнашивания, можно сделать вывод, что применение полиэфиркетоновой втулки позволило увеличить износостойкость сопряжения более чем в 1,5 раза относительно заводской бронзовой втулки.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для определения остаточного ресурса отремонтированных механизмов и изделий требуется принимать во внимание эксплуатационные и физико-механические свойства используемого материала.

При соблюдении всех норм и правил изготовления материала, его структура, при возвращении деталей в работоспособное состояние, задает физико-механические и эксплуатационные свойства, поэтому характеристика материала детали обязательно включает описание его структуры, даже если выдержаны заданные химический состав и технология изготовления [56].

С целью нахождения различий, исследовались втулки шкворневого узла из бронзы (БрОЦС5-7-12), пластика (ПЭВД 17703-010) и изготовленные из полиэфиркетона (Ketron РЕЕК 1000) .

3.1.Определение оценочных показателей восстановления деталей узлов трения с использованием композиционных материалов

На сегодняшний день актуальной темой в условиях сложной экономической ситуации является определение более оптимального метода ремонта пришедших в негодность поверхностей. При создании последовательности восстановления поверхностного слоя изношенных деталей, за базовую операцию берется метод ремонтной детали.

Метод математического моделирования решает задачу выбора лучшего для конкретной детали техпроцесса восстановления. В настоящее время кафедрой «Технической эксплуатации транспортных средств» разработано большое количество математических моделей упрочнения, восстановления и изготовления деталей применительно к различным методам ремонта деталей с достаточно выгодными по всем параметрам результатами [57].

Если сравнивать математическую модель с экспериментальными исследованиями, то она обладает следующими преимуществами:

1. значительная экономия материалов на изготовление;

2. возможность в максимально короткий промежуток времени оценить работоспособность систем;

3. даже за гранями экстремальных условий допустимо апробировать систему [83].

Выполнение математического моделирования можно разделить на несколько этапов:

- определение самой модели объекта, а также проработка способов её создания, в соответствии с полученными или уже имеющимися данными;
- прорабатывание и реализация методов создания задачи в компьютерных программах;
- в области уже существующей модели осуществление эксперимента, после чего проработка и оценка его результатов.

Далее, все эти составляющие представляются как математическое моделирование процессов производства. Поэтому заключительный этап может увеличить эффективность производства и обнаружить её новые способы.

Главным критерием, позволяющим производить оценку технологических маршрутов при решении вопросов выбора лучшего технологического процесса, являются оценочные показатели.

Для выявления этих показателей нами была выбрана теория производительности оборудования и труда профессора Прохорова В.М., при этом оптимальная последовательность восстановления осуществлялась по трудам профессора Балихина В.В. [51].

Следуя теории Балихина, технологическая производительность технологического процесса P_t может быть определена отношением работы на единицу времени.

$$P_t = A/t, \quad (3.1)$$

где A – тех. работа.

Данная работа при выполнении нанесения поверхностного слоя измеряется в граммах m^3 .

Если учитывать коэффициент использования основного времени n_{t0} ,

действительную производительность обработки покрытия можно определить [57]:

$$P_d = n_{t0} * P_T, \quad (3.2)$$

$$n_{t0} = t_o / t_n \quad (3.3)$$

где t_o - время обработки основное, мин;

t_n -нормируемое время на осуществление процесса, мин;

Технологическая производительность с учетом затрат выразится следующей зависимостью [57]:

$$P_T = K_2 / N_n, \quad (3.4)$$

где K_2 - удельные затраты на тех. процесс;

N_n - полезная мощность, которая была затрачена при выполнении обработки поверхностного слоя, кВт.

Потеря мощности от источника питания до места обработки учитывается коэффициентом полезного использования n_N [57].

Следовательно, технологическую производительность можно выразить следующим образом [57]:

$$P_T = K_2 N_n = (K_2 n_N N_n) / n_N = K_1 N_T \quad (3.5)$$

$$K_1 = K_2 n_N \quad (3.6)$$

где K_1 —затраты оборудования (энергетические), г/кВт-ч;

N_T - технологическая мощность, которая расходуется при выполнении операции данным оборудованием, кВт [57].

Таким образом, действительная производительность оборудования, на котором выполняется операция восстановления втулок вычисляется по формуле [57]:

$$P = n_{t0} * n_N * K_2 * N_T = n_{t0} * K_1 * N_T \quad (3.7)$$

Для выбора рационального метода восстановления втулок шкворневого узла проведем сравнение оценочных показателей напыления и восстановления с использованием композиционных материалов. Определяем основное время

изготовления [56].:

$$T_o = T_n + T_{\text{выд}} + T_{\text{ох}} = 0,5 + 3,95 + 6 = 10,45 \text{ час}, \quad (3.8)$$

где T_n - время нагрева детали до температуры во время обработки композиционного материала, ч.;

$T_{\text{выд}}$ - время выдержки детали при температуре во время обработки, ч.;

$T_{\text{ох}}$ - время охлаждения детали, ч.

Определяем штучно-калькуляционное время обработки.

$$T_{\text{штк}} = T_o + T_{\text{всп}} + T_{\text{доп}} + T_{\text{п.з.}} \text{ час}, \quad (3.9)$$

где T_o - основное время, час;

$T_{\text{всп}}$ - вспомогательное время, час;

$T_{\text{доп}}$ - дополнительное время, час;

$T_{\text{п.з.}}$ - подготовительно-заключительное время, час.

$$T_{\text{штк}} = 0,46 + 0,6 + 0,2(9,85 + 0,5) + 0,5 = 13,09 \text{ час}$$

Тех. производительность процесса обработки составит:

$$P_T = \frac{m \cdot n}{T_o} = \frac{50 \times 100}{10,45} = 478,5 \text{ г/ч}, \quad (3.10)$$

где m - масса порошка на одну деталь

n - кол-во деталей в партии [56].

Взвешивание материала производилось при помощи лабораторных весов с точностью взвешивания 0,01 г модели ВСТ-600/0,01.



Рисунок.3.1 Лабораторные весы электронные, предел измерений до 500 г, точность – 0,01 г. (ВСТ-600/0,01)

Действительная производительность процесса изготовления составит:

$$\Pi_1 = n_r * \Pi_r = 382,2 \text{ г/ч} \quad (3.11)$$

$$n_r = T_o / T_{\text{штк}} = 10,45 / 13,09 = 0,8$$

Полезная мощность, затраченная в целом на весь процесс изготовления:

$$N_{\Pi} = 2,4 + 0,3 = 2,7 \text{ кВт} \quad (3.12)$$

Технологическая мощность, затраченная в целом на весь процесс и:

$$N_{\text{Тех}} = 4,4 + 0,35 = 4,75 \text{ кВт} \quad (3.13)$$

Удельная энергопроизводительность процесса:

$$K_2 = 478,5 / 2,7 = 177,2 \text{ г/кВт-ч.}$$

Удельная энергопроизводительность оборудования:

$$K_1 = 478,5 / 4,75 = 100,7 \text{ г/кВт-ч.}$$

Оценочные показатели для изготовления принимаем из [83].

Таблица 3.1 Оценочные показатели способов нанесения покрытия

Показатель	Π_r г/ч	Π_1 г/ч	N_{Π} кВт	$N_{\text{Тех}}$ кВт	K_2 г/кВтч	K_1 г/кВтч
Напыление	180	144	2,76	4,85	65,2	37,1
Композиционные материалы	478,5	382,2	2,7	4,75	177,2	100,7
Наплавка под флюсом	835,9	503,2	3,64	7,98	392,4	180,3
Вибродуговая наплавка	1125	601,2	2,7	5,67	441,7	210,1
Наплавка в СОг	1008	480,2	2,74	6,38	725	429
Электроконтактная наплавка	808,8	379,2	3,86	4,37	209,5	185

Данные, которые отражены в таблице 3.1, дают возможность задавать более продуктивные методы обработки покрытия, а также при помощи коэффициента долговечности осуществлять оптимальный маршрут восстановления деталей. По сравнению с напылением способ восстановления композитами обладает лучшими цифровыми показателями и практически не уступает методу наплавки. Однако из-за труднодоступности и малых размеров, метод наплавки далеко не везде актуален.

3.2. Исследование микроструктуры изготавливаемого материала

Исследование микроструктуры материала выполняется для оценки влияния термомеханического цикла в месте контакта полиэфиркетоновой втулки с металлическим шкворнем.

Механическая обработка втулки выполняется на токарном станке. Шероховатость устанавливается в пределах $R_z = 20 \dots 170$ мкм для более лучшего сцепления. Исследование микроструктуры выполнялось на микроскопе марки Leica DM8000 при увеличении в 1000 раз. При выполнении исследования рассмотрены:

- каждая пора на площадь;
- образец на пористость;
- форма круг – фактор.

Необходимо выделить, что во время проникновения частиц песка в материал, возрастает его пористость, формируются пустоты, как следствие - микротвердость детали возрастает.

При исследовании рассматриваемых материалов на рисунке 3.2. можно сделать вывод о том, что полиэфиркетон имеет гораздо меньшую пористость, нежели пластиковая втулка или бронзовая при одинаковом ресурсе работы (заявлен гарантийный ресурс пластиковой и бронзовой втулки).



Рисунок. 3.2 Структура материалов после пройденного гарантийного ресурса в 40 тыс.км.

Возникающая переходная зона, в результате диффузии приводит к обеспечению жесткости соединяемых материалов и в процессе эксплуатации не дает допустить отслоение покрытия. При этом составляющей покрытия являются

поры. При исследовании материалов выявлено, что геометрическая форма пор абсолютно разная и их образование происходит как при выгорании частиц, так и при неполном контакте.

Рассматриваемый материал полиэфирэфиркетон (Ketron PEEK) – применяется там, где необходима повышенная устойчивость к реагентам и температуре. Данный материал обладает высокой рабочей температурой в диапазоне 240-320 градусов по Цельсию, а также прочностью и твердостью. Кроме этого он не проводит ток и не горит [6].

Одно из прогрессивных перспективных направлений повышения качества машин и приборов - переход от шероховатых поверхностей к поверхностям с регулярным микрорельефом. Создание регулярных микрорельефов в настоящее время наиболее надежно и эффективно осуществляется методом вибрационного накатывания. Далее приведены схемы вибронакатывания поверхностей различной формы и результаты полнофакторного эксперимента с использованием вибрационной головки для нанесения микрорельефа на внутреннюю поверхность втулок шкворневого узла рулевого управления, выполненных из композиционных материалов. На основе эксперимента можно сделать вывод, что применение вибронакатки полезно для деталей из любого материала.

От шероховатости поверхностей деталей зависят все эксплуатационные свойства машин, приборов, аппаратов и, в первую очередь, их надежность и долговечность. Решение задачи оптимизации шероховатости поверхности усложняется тем, что все традиционные методы финишной обработки создают поверхности с нерегулярным микрорельефом. Регуляризация микрорельефов создает необходимые предпосылки для расчетного нормирования микрогеометрии поверхностей деталей [78].

Метод вибрационного накатывания позволяет весьма тонко и в больших пределах регулировать высотные, шаговые, площадные размеры регулярного микрорельефа, а также взаиморасположение его неровностей, варьируя лишь режим токарного, фрезерного или другого универсального металлообрабатывающего станка, на котором устанавливается несложная и

недорогая в изготовлении виброголовка. На основе строгой аналитической связи между режимом вибронакатывания и численными значениями параметров регулярного микрорельефа можно аналитически рассчитывать и прогнозировать любой регулярный микрорельеф по ГОСТ «Поверхности с регулярным микрорельефом», оптимальный для тех или иных условий эксплуатации поверхности детали [78].

Параметр полностью регулярного микрорельефа (ПРМР)- число выступов и впадин, приходящихся на квадрат 25x25мм, рассчитывают по формуле:

$$N=625i/Pd_3S, \quad (3.13)$$

а угол наклона канавок относительно оси цилиндрической заготовки А- по формуле:

$$tgA=4L_i/Pd_3, \quad (3.14)$$

где d_3 - диаметр обрабатываемой заготовки, $i=n_{дв.х}/n_3$, L - амплитуда осцилляций инструмента, S -подача; n_3 - скорость вращения заготовки, $n_{дв.х}$ - число двойных ходов инструмента.

Как видно из схем на рисунке 3.3, сущность процесса вибронакатывания состоит в том, что в его основе лежит не резание, а тонкое пластическое деформирование поверхностных слоев обрабатываемого материала высокотвердым деформирующим элементом (шаром или твердосплавным, или алмазным наконечником), упруго вдавливаемым в обрабатываемую поверхность заготовки и совершающим относительно нее сложное движение по одной из схем. Вид микрорельефа, а также значение его параметров можно весьма тонко и в больших пределах варьировать, изменяя соотношение скоростей движений заготовки n_3 , и деформирующего элемента ($S, n_{дв.х}, L$).

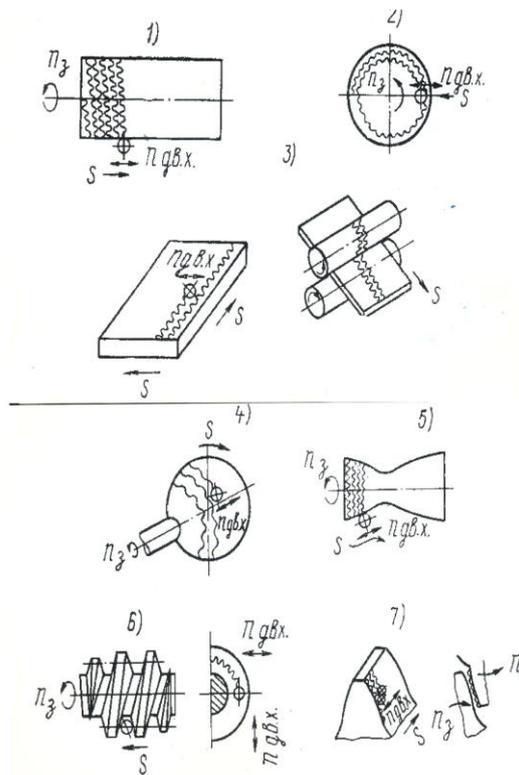


Рисунок.3.3 Схемы вибронакатывания поверхностей различной формы (1.-цилиндрическая, 2- торцовая, 3-плоская, 4-сферическая, 5-профильная,6- винтовая, 7-эвольвентная).

Большим числом исследований уже выявлены оптимальные регулярные микрорельефы рабочих поверхностей многих деталей, что привело к существенному улучшению различных их эксплуатационных характеристик:

- повышение контактной жесткости;
- повышение коррозионной прочности;
- улучшение сопротивляемости фреттинг коррозии;
- потери на трение снижаются;
- плавность хода в парах повышается;
- отсутствие образования задиров, рисок и заклинивания;
- уменьшение по времени прирабатываемости деталей;
- улучшение склеиваемости.

Вибронакатывание в частности обеспечило:

1. Улучшение прирабатываемости и увеличение ресурса работы гильз цилиндров и вкладышей двигателей в 1,5-1,6 раза;

2. Повышение жесткости листов и лент, прокатанных в вибронакатанных валках на 25-30%, усталостной прочности на 15-20%, исключение необходимости дополнительной абразивной и другой отделки;

3. Повышение гидроплотности и износостойкости резино-манжетных уплотнений до 2-2,5 раз.

В настоящее время основным методом выявления оптимального микрорельефа, комплекта и численных оптимальных значений параметров является экспериментальное исследование на основе многофакторного эксперимента.

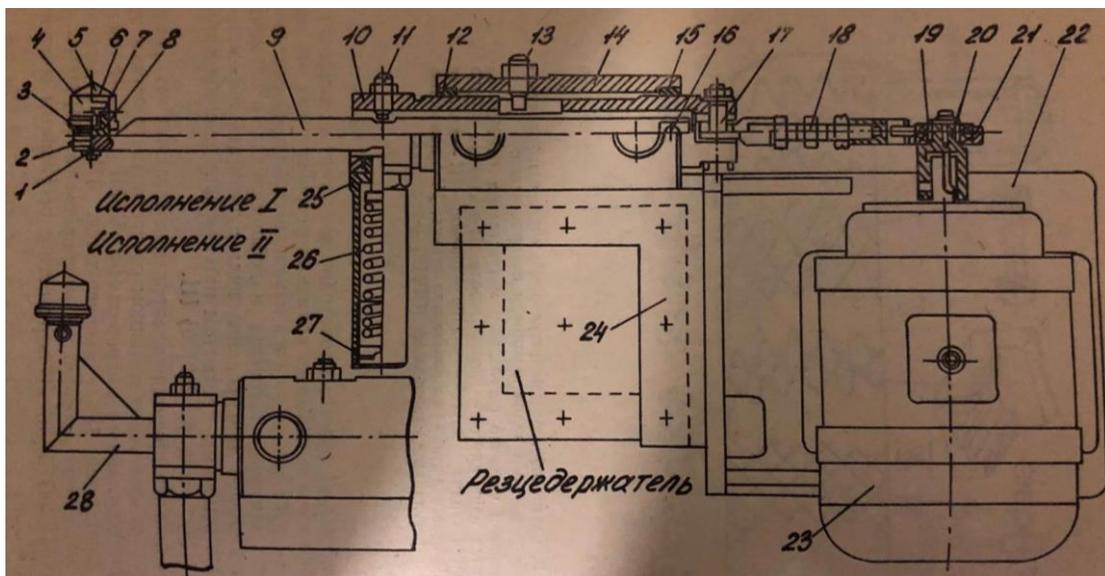


Рисунок.3.4 Схема универсальной виброголовки. 1-винт; 2-стопорный винт; 3- резьбовое кольцо; 4-сепаратор колпачок; 5-рабочий шар; 6- подшипник; 7-ось; 8-корпус; 9- шток; 10,14,20-втулки; 12-15 вкладыши; 16-штифт; 17- гайка; 19 - эксцентрик; 21-шпоночный паз; 22-крепление; 23-двигатель; 24-угольник;25-кожух пружины;26- пружина для тарировки; 27- пробка; 28- шток

На рисунке 3.7 приведены графики экспериментально выявленных зависимостей различных эксплуатационных свойств от стандартных и нестандартных параметров шероховатости и регулярных микрорельефов поверхности деталей. Графики показывают что многие зависимости нелинейные (износ, прочность посадок, плавность хода, гидроплотность) и участок оптимума весьма мал, что требует тщательного экспериментального его выявления. Именно в подобных случаях, когда на стадии проектирования по тем или иным причинам

не выявляется и, как следствие, не нормируется конструктором оптимальная шероховатость или регулярный микрорельеф, в процессе эксплуатации изделия – патологические виды трения и износа (надиры, задиры, и как следствие отказы и чрезмерно быстрый износ, нарушение плавности хода и др.).



Рисунок.3.5 Процесс вибронакатки

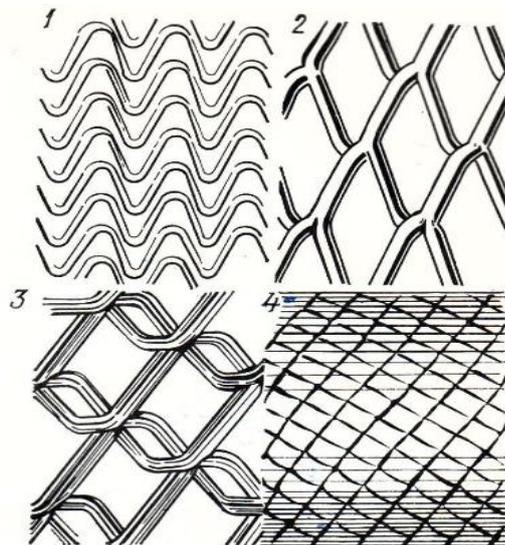


Рисунок 3.6 Основные виды регулярных микрорельефов:

- 1- с касающимися канавками;
- 2- с некасающимися канавками;
- 3- с пересекающимися канавками;
- 4- полностью новый микрорельеф.

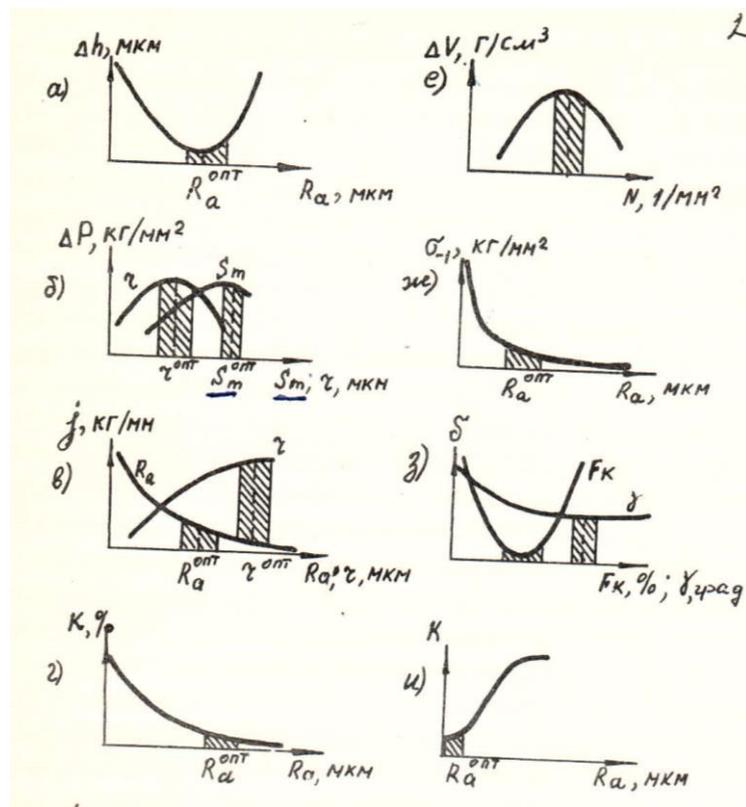


Рисунок 3.7 Типовые графики экспериментально выявленных зависимостей эксплуатационных свойств деталей от различных стандартных параметров и нестандартного радиуса скруглений вершин поверхностей r : а- износ, б-прочность посадок, в-контактная жесткость, г-коррозионная стойкость, е- гидроплотность, ж- усталостная прочность, з-плавность хода, и –коэффициент потерь в волноводах СВЧ.

Таблица 3.2 Изменение основных параметров шероховатости внутренней цилиндрической поверхности на заготовках из исследуемых материалов вибронакатыванием

Материал		ПЭВД 17703-010	Полиэфиркетон
Обработка поверхности заготовки до вибронакатывания	Вид обработки	Растачивание отверстия	Растачивание отверстия
	Достигнутый квалитет	8	9
R_a , мкм	до вибронакатывания	1,9	1,72
	после вибронакатывания	1,11	0,69
Изменение параметра R_a		Уменьшение на 42%	Уменьшение на 60%
R_z , мкм	до вибронакатывания	18,47	13,15
	после вибронакатывания	8,39	4,82
Изменение параметра R_z		Уменьшение на 60%	Уменьшение на 63%

В настоящей работе был произведен анализ микроструктуры 2 сравниваемых материалов ПЭВД и полиэфиркетона, из которых сделаны втулки шкворневого узла рулевого управления грузового автомобиля Scania R серии. Измерение производилось по 2 параметрам R_a (значение исследуемого профиля с возможным отклонением, мкм) и R_z (высота измеряемых поверхностей по 10 точкам, мкм). Результаты анализа приведены в таблице 3.2. Измерения проводились с помощью профилографа ЩП-17 ГОСТ 170623. Анализ микроструктуры показал, что перспективность и эффективность в науке и технике направления регуляризации микрорельефов поверхностей деталей машин приборов машин и аппаратов безусловны.

3.3. Исследование твердости по длине и толщине покрытия

Были выполнены контрольные измерения с целью определения твердости испытуемых образцов материалов по методу Роквелла в продольном направлении на длине в 35мм и разной толщине от 0,5 до 2мм с шагом 0,5 мм.

В каждой точке количество исследований составило не менее трех. С учетом специфики прибора, число контрольных измерений составило восемь единиц с шагом 3мм. Далее было выведено среднее арифметическое контрольных измерений. Следуя методу Роквелла, шероховатость поверхности составила не более 8 мкм. Нагрузки при испытании, составляли 990 Н. Погрешность прибора, находилась в пределах одной единицы твердости. По требованиям ГОСТ шероховатость в месте измерения твердости не должна превышать значение 2 мкм, поэтому было выполнено предварительное шлифование с помощью полировальной пасты Autosol.

На рисунке 3.8. представлены графики исследования по твердости трех рассматриваемых образцов из заводского пластика ПЭВД 17703-010, бронзы (БрОЦС5-7-12) и полиэфиркетона (Ketron PEEK 1000).

По итогам наблюдений, установлено незначительное изменение по толщине покрытия, при этом, твердость в середине на всех трех образцах становится меньше, чем по краям образцов. Полиэфиркетон имеет более высокую

твёрдость (НВ-130), по сравнению с другими материалами.

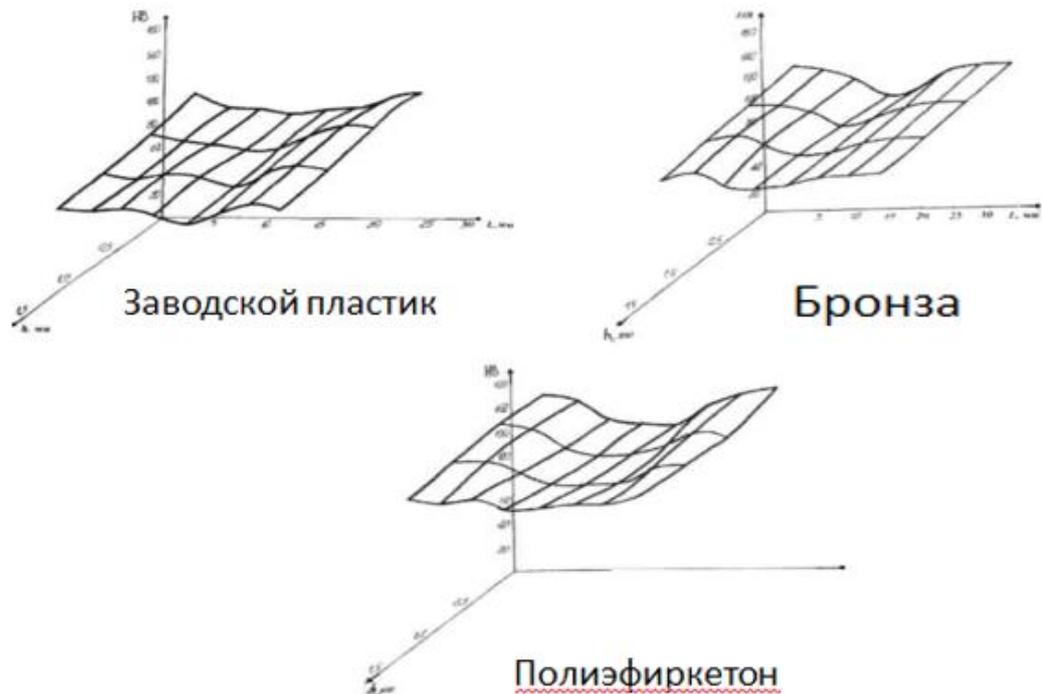


Рисунок 3.8 Исследование твердости композиционных покрытий

3.4. Исследование твердости по площади покрытия

Измерение микротвердости по площади покрытия произведено по ГОСТ 9450-80. Данное измерение необходимо перед внедрением того или иного материала в тяжело нагруженные узлы трения. Исследование производилось по ширине и длине образцов, так как микротвердость не имеет зависимости от пористости материалов.

Измерение микротвердости определялось путем давления алмазной пирамиды с углом в 138 градусов в поверхность испытуемого материала, которая была заранее отшлифована. Нагрузки находились в пределах 10-2100 мН (рисунок.3.9)

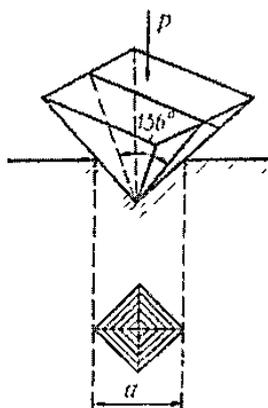


Рисунок. 3.9 Схема испытаний на микротвердость по Виккерсу

Химический состав присадок в полиэфиркетон может менять положение частиц, отсюда прямая зависимость величины микротвердости покрытия исследуемого материала, которая может быть в широком диапазоне. Микротвердость определялась по трем измерениям в каждой точке. При этом, давление на пирамиду находилось в пределах от 60 до 100г. Исследования выполнялись на приборе ПМТ-4. Согласно проведенным измерениям, можно сделать вывод о пределе текучести каждого рассматриваемого материала.

На рисунках 3.10,3.11,3.12. представлены графики, созданные в программе Surfer, в соответствии с полученными измерениями. Графики наглядно показывают, что заводской пластик имеет худшие показатели микротвердости и как следствие, втулка из этого материала быстрее всех выйдет из строя. Образцы из бронзы и полиэфиркетона обладают практически одинаковыми показателями микротвердости ($HV=1250...1450$). Следствием этого будет являться то, что втулки из данных материалов будут иметь более длительный ресурс, по сравнению с заводским пластиком марки ПЭВД 17703-010.

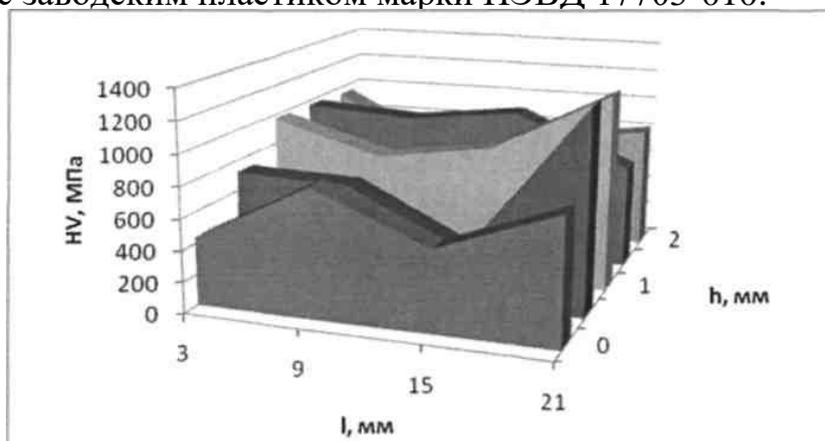


Рисунок. 3.10 Микротвердость пластика

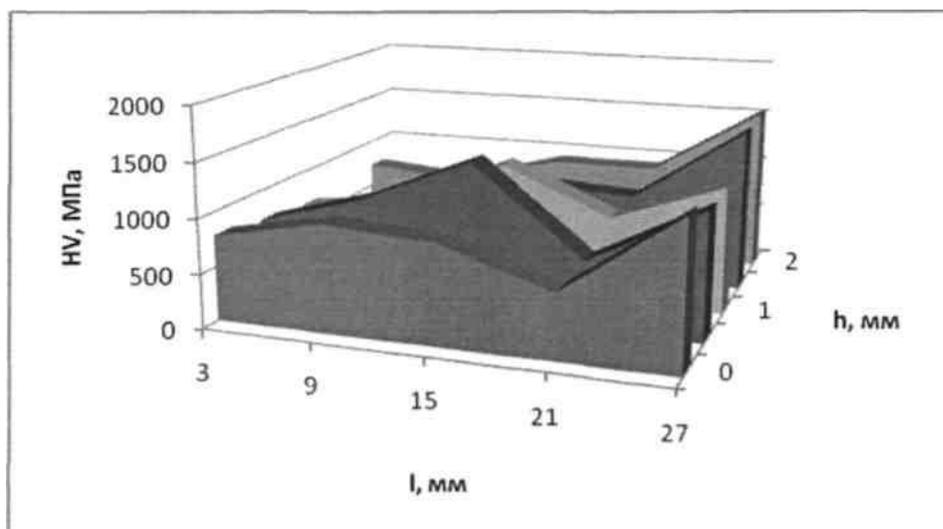


Рисунок. 3.11 Микротвердость бронзы

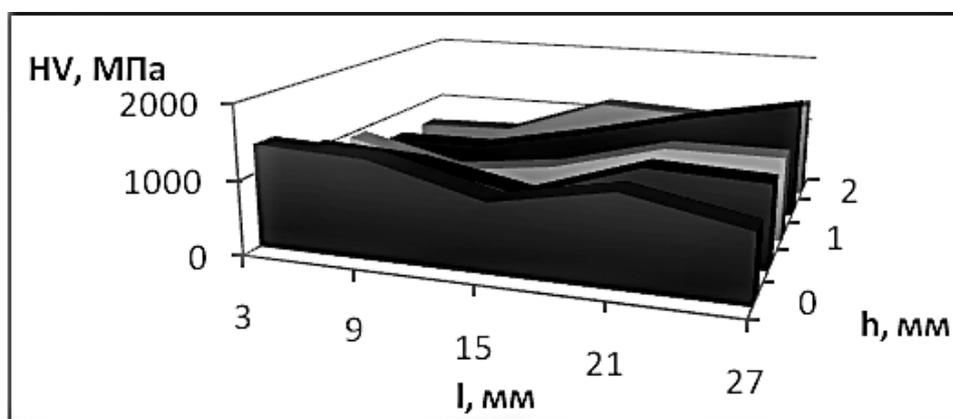


Рисунок..3.12 Микротвердость полиэфиркетона

3.5. Исследование пористости покрытия

При проведении измерения на пористость размер образца должен быть не меньше 0,5 см³. Вместе с тем поверхность испытуемого образца должна быть обезжирена. Образцы были выполнены в форме колец, с внутренним диаметром, повторяющим размеры шкворневых узлов рулевого управления двух рассматриваемых автомобилей (45 мм и 40,5 мм соответственно). Для того, чтобы определить вес образца были взяты электронные весы марки ВСТ-600/0,01.

Во время выполнения исследований материала на пористость, необходимо обязательно выполнять определенные условия, а именно:

- температура воздуха при испытании должна находиться в пределах от 10 до 35 градусов по Цельсию;
- использование только дистиллированной воды;
- диаметр нержавеющей проволоки не более 0,25мм;

- минимальное количество витков нержавеющей проволоки у корзинки;
- фильтрованная бумага и парафин согласно ГОСТу.

Чтобы определить плотность, образцы до 5 см³ погрешность 0,001г., свыше 0,01 г.. Поры формовки пропитывают в парафине (до того момента как пузырьки перестанут образовываться), благодаря чему они закрываются. После пропитывания происходит высушивание бумагой, до того состояния, пока масса формовки останется неизменной. Далее происходит процесс взвешивания полностью погруженной формовки в сосуд с дистиллированной водой, так, чтобы наблюдалось отсутствие пузырей воздуха. Погрешность измерения температуры не более одного градуса Цельсия. Плотность формовки вычисляется по следующей формуле:

$$p = m_1 * p_{\text{в}} / (m_2 - m_3), \quad (3.16.)$$

где m_1 — взвешенная в воздухе масса формовки, г;

m_2, m_3 — взвешенной в воздухе и воде масса формовки, г;

$p_{\text{в}}$ — плотность воды, г/см³.

Полученные результаты после проведения исследования отображены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Полученные данные исследования на пористость покрытий

№	Материал	$\rho_{\text{к}}$, г/см ³	h, мм	$m_{\text{возд}}$, г	$m_{\text{воды}}$, г	ρ , г/см ³	П, % (пористость)
1	БрОЦС5-7-12	7,8	3,15	5,3285	4,4205	5,87	24,7
2			3,90	5,7850	4,8603	6,26	19,7
3			3,0	4,5975	3,7972	5,74	26,4
4	ПЭВД 17703-010	7,7	3,3	5,2065	4,2810	5,63	26,9
5			4,0	6,7287	5,7250	7,21	6,4
6			3,2	5,5723	4,7501	6,78	11,9
7	Ketron РЕЕК 1000	7,56	3,2	5,4943	4,7033	7,1	7,7
8			2,8	4,5682	4,0045	7,2	6,9
9			3,7	6,3794	5,4723	7,2	6,9

Согласно данным, приведенным в таблице, пористость полиэфиркетона близка к эксплуатационным условиям подшипников скольжения и превосходит все оставшиеся сравниваемые материалы по всем показателям.

3.6. Исследование коррозионной стойкости испытываемых образцов

Так как шкворневые узлы работают в условиях агрессивной среды (подвергаются попаданию частиц абразива с водой), необходимо также выполнить исследование рассматриваемых материалов на коррозионную стойкость.

Ввиду отсутствия одинаковых масс у испытываемых образцов, было принято решение взять за 100% начальную массу каждой втулки. При этом, при контрольных измерениях фактическая масса образцов будет выражена в процентах от начальной.



Рисунок 3.13 Образцы для испытания

Для ускорения процесса коррозии в 350 мл сосуд с водой добавляем 1/70 хлорида натрия от массы воды. В полученный раствор погружаем образцы на 30 дней. Каждую неделю извлекаем образцы и очищаем наждачной бумагой их поверхность и далее производим замер их массы. Все сосуды с образцами должны находиться при единой температуре, не ниже 20 градусов по Цельсию.

После проведенного испытания рассчитываем процент поглощения материала коррозией по приведённой формуле:

$$T = m_i * t_2 * 100, \% \quad (3.17)$$

где m_i - исходная масса образца, гр;

t_2 - масса образца в день взвешивания, гр.

Учитывая полученные результаты, в программе Grapher был построен график зависимости процента поглощения коррозией материалов с учетом дней, отображенный на рисунке 3.14.:

Согласно графику, можно сделать вывод, что полиэфиркетон в 2,5 раза более стоек к коррозии, нежели чем втулка из бронзы и в 1,5 раза больше относительно заводского пластика.

Также были вычислены зависимости методом аппроксимации [9]:

$$Y(\text{бронзы})=0,165+0,062x \text{ (при } K_{\text{кор}}=0,976), \% \quad (3.18)$$

$$Y(\text{заводского пластика})=0,191+0,037x \text{ (при } K_{\text{кор}}=0,948), \% \quad (3.19)$$

$$Y(\text{полиэфиркетона})=0,027+0,027x \text{ (при } K_{\text{кор}}=0,994), \% \quad (3.20)$$

где x — дни;

$K_{\text{кор}}$ — коэф-т корреляции.

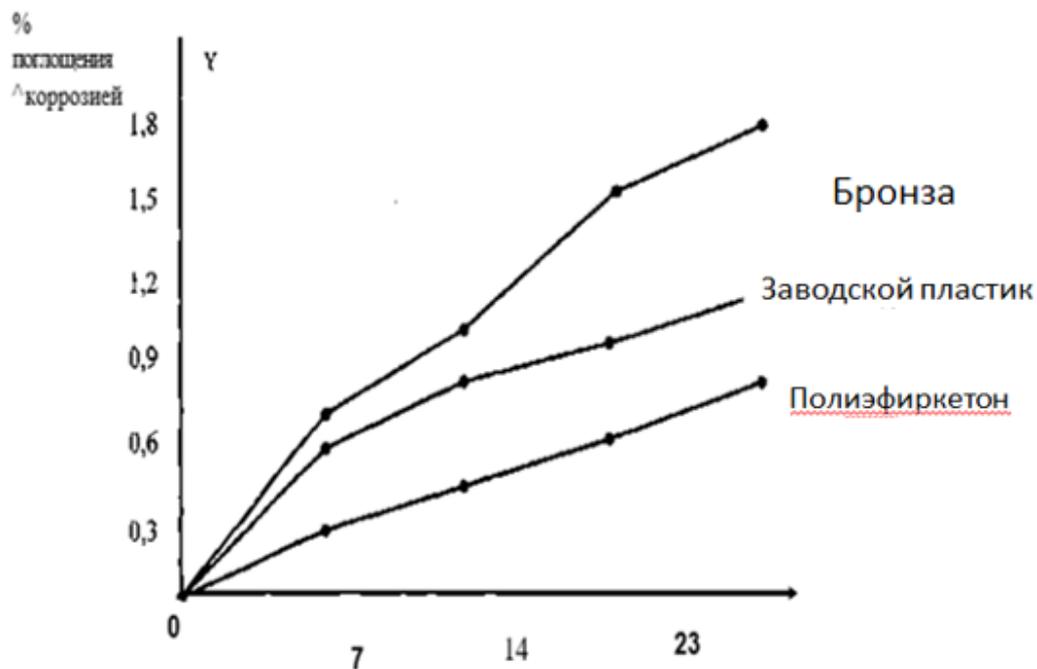


Рисунок.3.14 График поглощения материала коррозией

Исходя из всех вышеописанных экспериментов и данных по ним, можно констатировать следующее: рассматриваемый материал полиэфиркетон имеет отличную устойчивость к коррозии. Если учитывать, что данный материал будет работать в сопряжении со шкворнем, который особенно подвержен воздействию влаги, очевидно, что полиэфиркетон в большей мере удовлетворяет требования к деталям автопоездов.

3.7. Исследование влияния параметров эксплуатации на интенсивность изнашивания сопряжений

Попадание в триботехническую пару продуктов износа и частиц песка с дороги, необслуживаемость многих узлов автомобиля, возникновение высоких по величине радиальных и осевых нагрузок, все это приводит к увеличению износа сопрягаемых поверхностей. Как следствие, износ приводит к преждевременному выходу из строя шкворневых узлов автопоезда.

Поэтому, с целью проверки узла на износостойкость, необходимо на различных нагрузочных режимах провести эксперименты. За оценочный показатель принимается скорость износа всего узла. Предмет исследования втулка-шкворень.

Чтобы определить скорость изнашивания, необходимо вычислить износ сопрягаемых деталей. В данном случае очень важным является экспериментальное апробирование технологических режимов рассматриваемых материалов в целом на износостойкость сопряжения [83].

В качестве предмета исследования по известной методике выбрано сопряжение деталей шкворень-втулка [83].

В качестве оценочного показателя износостойкости была выбрана скорость изнашивания сопряжения в целом [83].

Для оценки скорости изнашивания приняты следующие зависимости:

$$U=N/t \quad (3.21)$$

где u - износ шкворня и втулки, мм;

N – циклы нагружения до периода изнашивания;

t - время установки в работе, час [83].

В качестве вала был выбран заводской шкворень, а в качестве втулки взят материал- полиэфиркетон.

Испытание были проведены на базе машины трения модели 20-70 СМТ-1, следуя правилам проведения испытаний триботехнических пар типа "втулка-вал". Указанный комплекс изображен на рисунке 3.15.



Рисунок.3.15 Машина трения 20-70 СМТ-1

При проведении эксперимента были выполнены следующие требования:

1. Испытания триботехнических пар осуществлялись согласно паспортным данным реальных пар трения. На каждую пару составлялся отдельный паспорт с внесением всех необходимых записей;
2. Комплект для испытаний представлял из себя 1 валик и 4 втулки. На все места, где производились замеры, была нанесена отметка.
3. С помощью нутромера и микрометра были произведены контрольные замеры по центру и краям деталей. Сопряженные диаметры измерялись после разборки микрометром и нутромером с точностью до 0,01 мм в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и в трех точках, в центре и по краям, при этом зазор определялся как среднеарифметическое значение всех измерений [83].

Испытания были проведены на базе машины трения модели 20-70 СМТ-1. Условия были приближены к эксплуатационным в реальных условиях. Нагрузка была оттарирована динамометром и составила значение в 14000 Н , что соответствует ударной нагрузке в 70 мН/м^2 на каждом шкворне. При этом заданы обязательные условия:

- вращательный характер движения;
- при частоте вращения вала в 40 об/мин, максимальная скорость

скольжения $V_{\max}=0,095$ м/сек;

- обязательное применение консистентной смазки ШНУС 1;
- обеспечение к каждому кронштейну частиц кварцевого песка к контактирующим деталям;
- при приработке в 1600 циклов нагрузка составила 14000Н, 1000 циклов при $P=2400$ Н и 600 циклов при нагрузке $P=4500$ Н.

С помощью термопары производилась фиксация температурных значений. Диапазон измерения температуры составил 0-250°C. Через каждые 60 циклов производилось уменьшение температуры на 35 градусов по Цельсию, с выдержкой по времени не менее 30 минут. Испытания останавливались при резком повышении температуры до 150-160 градусов. Это происходило примерно на 600 циклах. Допустимое температурное значение для данного типа испытаний находится в пределах 100 градусов по Цельсию.

Чтобы оценить износ, было произведено микрометрирование изделий, так как весовым методом не определить точно степень износа имеющегося комплекта деталей. Отсюда, скорость износа сопряжения может быть вычислена:

$$I = I_{\text{в}} + I_{\text{вт}}, \quad (3.22)$$

где I – Общая скорость износа, мм/час;

$I_{\text{в}}$ - скорость износа шкворня, мм/час;

$I_{\text{вт}}$ - скорость износа втулки, мм/час.

Для выполнения максимально точных измерений, необходимо, чтобы контурные давления и реальные температуры контактируемых деталей были равными [83].

Согласно измерениям, поверхностная температура трущихся деталей находится в пределах 175 градусов по Цельсию.

Исходя из этого следует, что от режима работы в контакте зависит тепловыделение, которое может быть вычислено по формуле [57]:

$$R = N \cdot V_{\text{ск}} \cdot f_{\text{мп}}, \quad (3.23)$$

где R – тепло при контакте, Вт;

$V_{\text{ск}}$ – скорость скольжения, м/с;

$f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения, при граничном трении $f_{\text{тр}}=0,1$.

Отведенное от сопряжения количество теплоты определяется [57]:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (T_1 - T_2) , \quad (3.24)$$

где Q – теплота, исходящая от ролика, Вт;

F – площадь ролика, м²;

T_1 – температура ролика на его поверхности, °К;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

T_2 – температура воздуха, °К.

Уравнение теплового баланса позволяет получить одинаковые температурные характеристики при теории и эксперименте. При этом, нагрузка представляет собой пик нагружения трибопары и выражается следующим образом:

$$N_{\text{кр.}} = \frac{\alpha \cdot F \cdot (T_{\text{кр}} - T_{\text{в}})}{V_{\text{ск}} \cdot f_{\text{тр}}} , \quad (3.25)$$

где $N_{\text{кр.}}$ – нагрузка, которая представляет собой предельную температуру сопряжения, Н.

В случае потери тепла стенками трубок, при воздушном обдуве, можно из следующего уравнения определить коэффициент теплоотдачи [57]:

$$N_u = c \cdot R_e^n , \quad (3.26)$$

где R_e – критерий Рейнольдса;

N_u – критерий Нуссельта;

c, n – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Численное значение коэффициента теплоотдачи можно получить, подставив в формулу значение критериев Нуссельта и Рейнольдса [57]:

$$\alpha = \frac{c \cdot \lambda}{d} \cdot \left(\frac{V_{\text{ск}} \cdot d}{\nu} \right)^n , \quad (3.27)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, численно равный $2,59 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К);

ν – вязкость воздуха кинематическая, численно равная $15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с [81];

d – диаметр ролика, м.

Для определения c и n уравнение (3.21) подставляется в уравнение (3.23)

$$\frac{N \cdot V_{ск} \cdot f_{мп} \cdot d}{F \cdot (T_{кр} - T_B) \cdot \lambda} = c \cdot \left(\frac{V_{ск} \cdot d}{\nu} \right)^n \quad (3.28)$$

Полученное уравнение можно вывести в виде степенного полинома путем логарифмирования

$$\lg \left(\frac{N \cdot V_{ск} \cdot f_{мп} \cdot d}{F \cdot (T_{кр} - T_B) \cdot \lambda} \right) = \lg c + n \cdot \lg \left(\frac{V_{ск} \cdot d}{\nu} \right) \quad (3.29)$$

В соответствии с методом наименьших квадратов, можно аппроксимировать результаты и найти численные значения коэффициентов. Подставляем (3.23) в (3.21) и получаем [81]:

$$N_{кр.м.} = \frac{77 \cdot \lambda}{d} \cdot \left(\frac{V_{ск} \cdot d}{\nu} \right)^{0.13} \cdot \frac{F \cdot (T_{кр} - T_B)}{V_{ск} \cdot f_{мп}}, \quad (3.30)$$

где $T_{кр.}$ – температура при номинальной мощности в шкворневом узле, $^{\circ}\text{К}$;

T_B – температура воздуха, $^{\circ}\text{К}$.

По следующей формуле можно определить поверхность охлаждения ролика:

$$F = \pi \cdot d \cdot \left(b + \frac{d}{2} \right), \quad (3.31)$$

где b – ширина ролика, м ; d – диаметр ролика, м;

Также, чтобы получить одинаковые условия трения при теории и эксперименте, необходимо достижение в трибоконтакте равных напряженных состояний [81].

Рассчитать контурное давление в подшипниках скольжения можно следующим образом:

$$P_c^p = \frac{N_p}{D \cdot l}, \quad (3.32)$$

где P_c^p – контурное давление в сопряжении, Па;

N_p – допустимая нагрузка на втулку, Н;

l – длина втулки, м;

D – диаметр шкворня, м.

Если тщательно обработать пару трения, то контурная площадь будет

минимальна и тогда контурное давление в моделируемой паре можно рассчитать следующим образом [57]:

$$P_c^M = \frac{N_M}{F_M}, \quad (3.33)$$

где P_c^M – контурное давление в паре трения, Па;

N_M – усилие, с которым колодка прижимается к ролику, Н;

F_M – площадь контакта пары трения, м².

Чтобы получить требуемые площади контакта в паре трения, необходимо принять, что $N_M \leq N_{кр}$ и приравнять уравнение (3.28) и (3.14) .

$$F_M \leq \frac{N_M}{N_p} \cdot D \cdot l . \quad (3.34)$$

Таким образом, пересчитать нагрузки с теории на практику можно согласно формуле [57]:

$$N_p = N_M \cdot \frac{D \cdot l}{F_M}. \quad (3.35)$$

От таких параметров как угол поворота и частота вращения узла, зависит средняя скорость скольжения. Поэтому моделируя процессы трения, данную скорость можно определить следующим образом:

$$V_{ск} = \frac{n \cdot \omega \cdot r \cdot \lambda}{30} \cdot \int_0^{30/n} \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\sqrt{1 - (\lambda \cdot \cos \omega t)^2}} dt, \quad (3.36)$$

где $V_{ск}$ – средняя скорость скольжения узла, м/мин;

n – частота, с которой узел вращается, об/мин;

r – радиус шкворня, м;

ω – скорость угловая, с⁻¹;

Вместе с тем:

$$\lambda = \frac{R}{L}, \quad (3.37)$$

где L – длина втулки, м.

R – радиус втулки, м;

В таблице 3.4. приведены основные параметры моделирования представленного сопряжения.

Таблица 3.4 Основные параметры моделирования

Моделир-е сопряжение	Темп-ра в рабоч. зоне, $T, ^\circ\text{C}$	Коэф. трения $f_{\text{тр}}$	Скорость скольж., $V_{\text{ск}}$, м/мин	Критич. нагрузка $N_{\text{кр.}}$, Н	Усилие прижатия $N_{\text{м}}$, Н	Площадь моделир. контакта $F_{\text{м}}$, мм^2	Норм. нагрузка на узел. $N_{\text{р}}$, Н
Шкворень (сталь 12ХН2)	20-120	0,08	0,65 - 1	900	150 - 850	60	$29,6 \cdot N_{\text{м}}$
Втулка (полиэфиркетон)							

Чтобы определить требуемые размеры колодки, необходимо вычислить площадь контакта, определённую из условий моделирования.[83]:

$$F_{\text{кол}} = \frac{\pi \cdot D \cdot h}{180} \cdot \arcsin \frac{b}{D}, \quad (3.38)$$

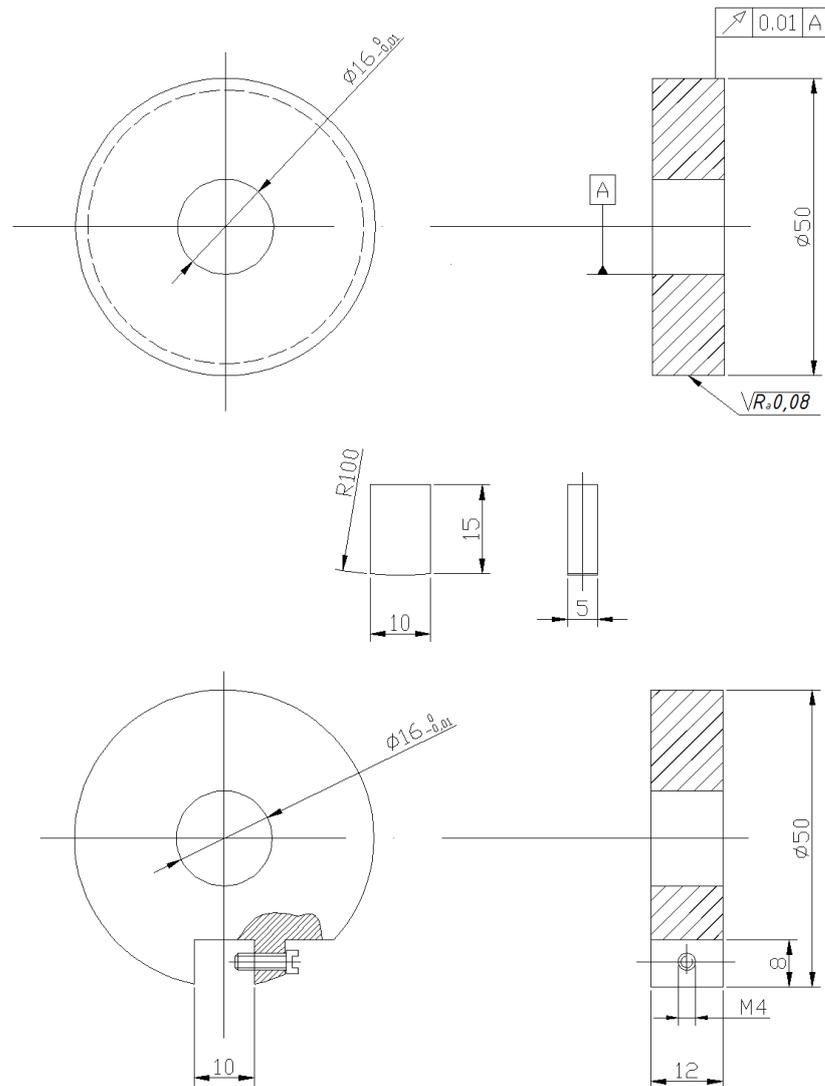
где $F_{\text{кол}}$ – площадь контакта, мм^2 ;

D – диаметр ролика, численно равный 50 мм;

h – ширина колодки, численно равная 12 мм;

b – длина колодки, мм.

На рисунке 3.16 приведен чертеж роликов для испытаний.



а) – ролик; б) – колодка; в) – держатель колодки

Рисунок 3.16 Образцы для проведения триботехнических испытаний на машине трения СМТ-1

Комплекс для проведения испытаний на трение

Для того чтобы определить, как выбранные материалы взаимодействуют друг с другом в рамках процесса износа, был создан стенд на базе машины трения модели 2070 СМТ-1. На него установлены высокоточные приборы и устройства, которые считывают данные и отправляют их на компьютер.

Для наглядного понимания работы комплекса, изображена его схема на рисунке 3.17.

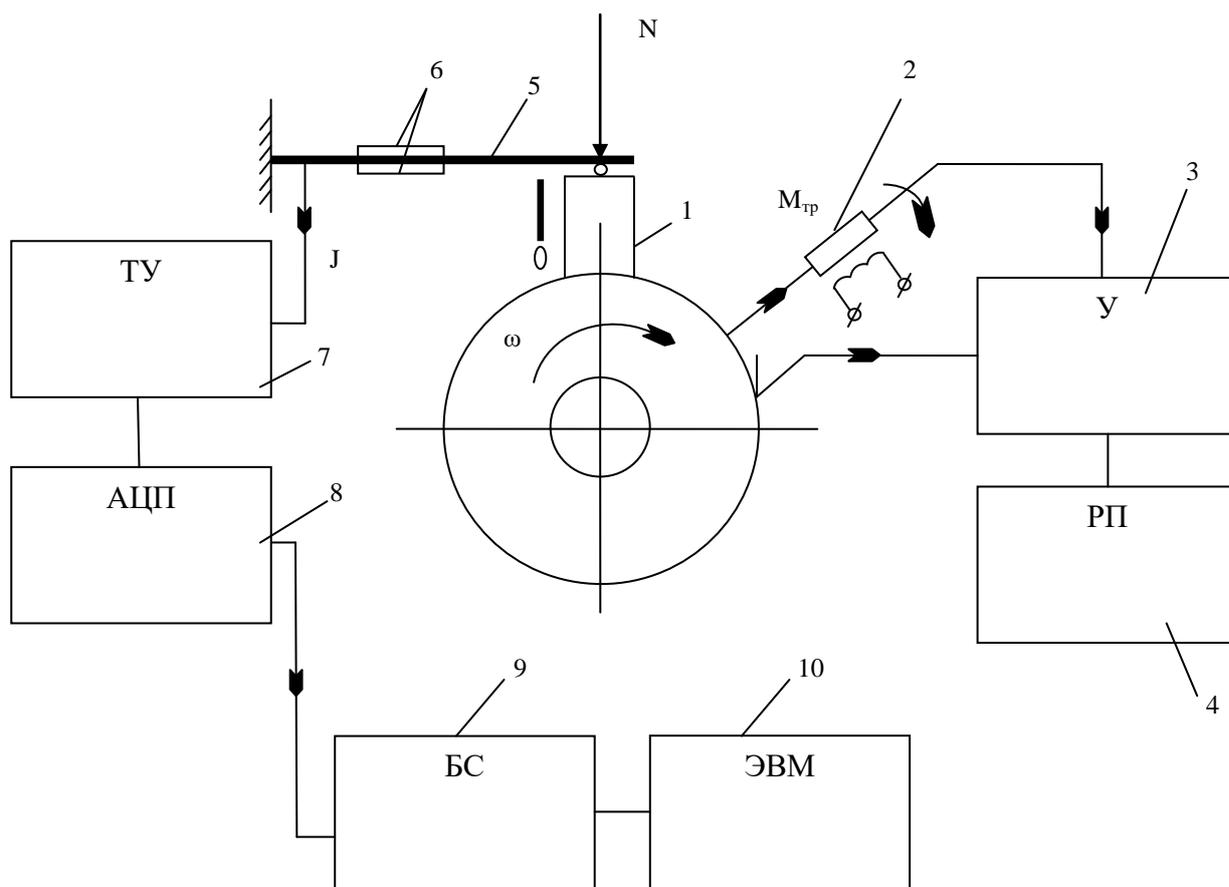


Рисунок 3.17 Схема комплекса для проведения триботехнических испытаний.
 1 – триботехническая пара; 2 – датчик момента трения;
 3 – усилитель; 4 – фиксатор данных; 5 – тензобалка;
 6 – тензосопротивления; 7 – усилитель сигнала от датчиков; 8 – преобразователь
 полученных данных; 9 – блок сопряжений; 10 – компьютер.

Основные характеристики, такие как, момент трения $M_{тр}$ и температура трения T , данная машина трения определяет за счет приборов, установленных в шкаф ее управления. Комплекс, для проведения триботехнических испытаний, показан на рисунке 3.18.

На рисунке 3.19 представлен сам узел трения, где отображены тензодатчик для измерения момента трения и индикатор, который показывает отклонение тензобалки во время работы комплекса. На комплексе измерение температуры производится с помощью термопары. Измерение производится согласно методу скользящего контакта, так как он прост и быстр в выполнении, особенно при появлении пленкообразования.

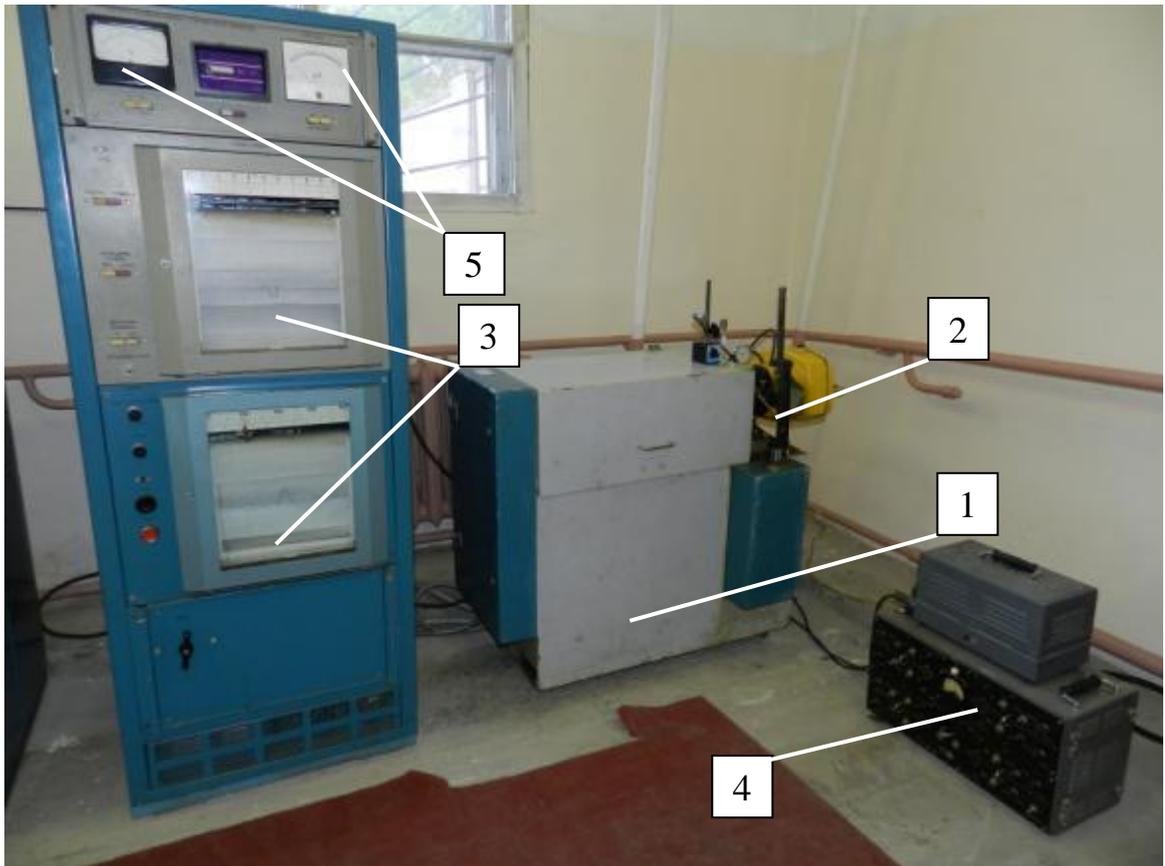


Рисунок 3.18 Комплекс для проведения триботехнических исследований
 1 – машина трения СМТ-1; 2 – узел трения; 3 – КСП-4; 4 – тензоусилитель
 8АНЧ-7М; 5 – приборы для контроля за частотой вращения и нагрузкой пары
 трения

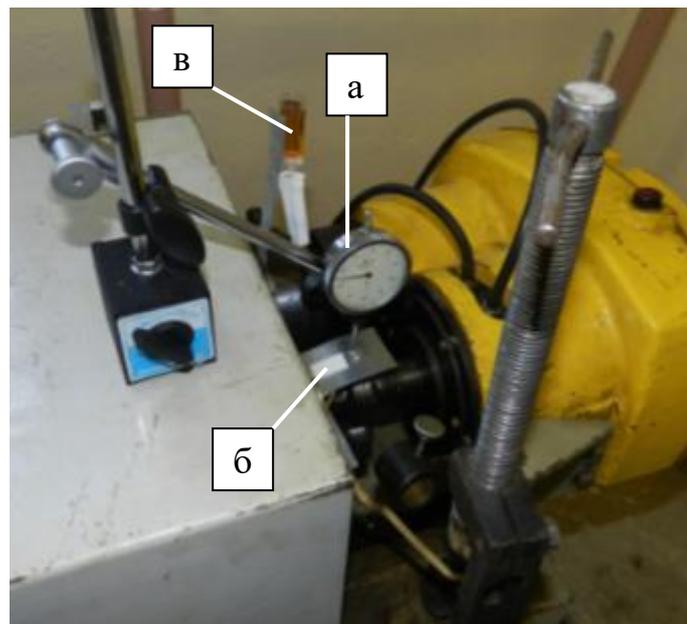


Рисунок 3.19 Узел трения
 а) – индикатор; б) – тензодатчик; в) – установка подачи масла

На рисунке 3.20 представлена электрическая схема соединения тензодатчиков, оно осуществляется по мостовой схеме. При этом сам датчик, который измеряет суммарный линейный износ, состоит из двух тензодатчиков модели ЗПКБ 10-250, размещенных на пластине из пружинной стали с высоким содержанием хрома в химическом составе.

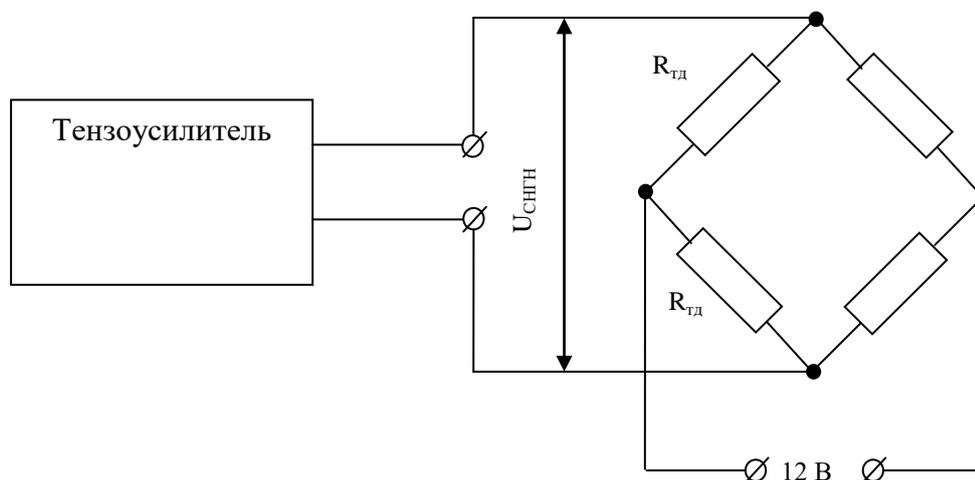


Рисунок 3.20 Электрическая схема соединения тензодатчиков.

При таком расположении датчиков, приведенная схема обеспечивает температурную компенсацию, а также усиливает сигнал за счет использования тензоусилителя модели 9АНЧ-8М. Это происходит по причине того, что датчики находятся в области сжимающих и растягивающих напряжений. Аналогово-цифровой преобразователь обрабатывает сигнал от тензоусилителя и преобразует его в данные, которые может прочесть компьютер. Измерение напряжения производится за счет установленного в данных комплекс цифрового вольтметра. Информация, которая идет через вольтметр, проходит через блок сопряжений и поступает компьютер. В компьютере уже производится выдача результатов в виде численных значений каждого из параметров.

Согласно блок-схеме комплекса, которая изображена на рисунке 3.21., происходит вычисление суммарной линейной интенсивности изнашивания пары трения. Прогиб тензобалки не должен быть больше 1мм, после того как испытуемые образцы будут установлены. Прогиб балки в 1 мм это 2,5 вольта на шкале вольтметра.

С помощью миллиамперметра ведется контроль над измерением регулярной

погрешности измерения износа . Наряду с этим, скорость скольжения задана, а нагрузка равна нулю.

Данная погрешность вычисляется по следующей формуле:

$$W_0 = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} U_{Ti} - U_{Bi} , \quad (3.39)$$

$$U_{Ti} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} X_i , \quad (3.40)$$

где

U_T – текущее значение показаний вольтметра;

U_B - базовое значение показаний вольтметра;

X_i – данные с вольтметра, которые показывают прогиб тензобалки в определенный момент времени.

Базовое значение показаний вольтметра определяется следующим образом:

$$U_{Bi} = U_{mi-1} . \quad (3.41)$$

После того как определена погрешность, подается необходимая нагрузка на образцы. Как только момент трения и температура на поверхности образцов перестанут изменяться, производится замер прогиба тензобалки. Через определенное время, которое соответствует заданному пути трения, производится заключительное измерение величин триботехнической пары. При этом, величина износа может быть изменена на величину погрешности, согласно формуле:

$$W = W_2 - W_1 - W_0 \cdot \frac{H}{V_{ск} \cdot T} , \quad (3.42)$$

где W – суммарный линейный износ, мкм;

H – заданный путь трения, м;

T – время цикла, с;

$V_{ск}$ – скорость скольжения, м/с.

Поправка конечного значения производится в случае отклонения температурных показателей во время начала наблюдения и вычисляется по формуле:

$$\Delta W_T = 0,074 \cdot (11,7 \cdot \Delta t + 0,0047 \cdot \Delta t^2) , \quad (3.43)$$

где ΔW_T –изменения размеров пары, зависящие от температуры, мкм;

Δt – температурное отклонение во время начала наблюдения, $^{\circ}\text{C}$.

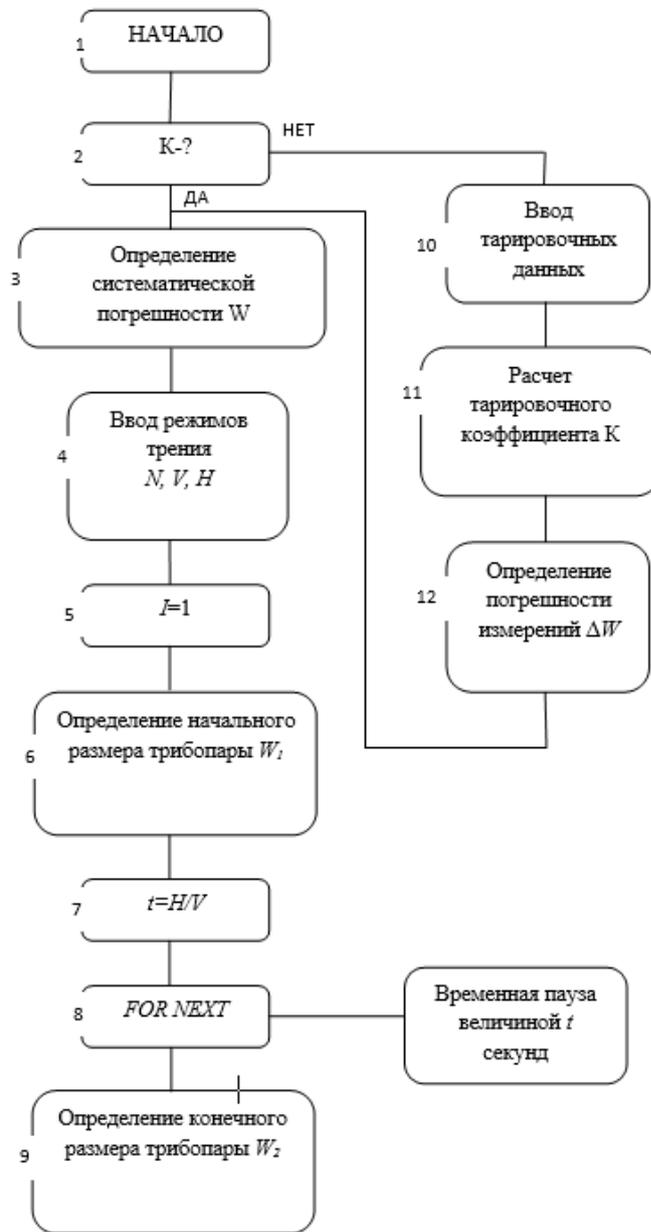


Рисунок 3.21 Блок-схема комплекса

В таком случае, еще одним основным показателем при измерениях, наряду с моментом и температурой трения, является интенсивность изнашивания пары, которую можно вычислить следующим образом:

$$J = \frac{W}{H}, \text{ мкм/м.} \quad (3.44)$$

Полученное значение интенсивности на конкретном нагрузочном режиме также фиксируется компьютером. Обработка всех поступивших данных

выполняется по методу наименьших квадратов. Также, рассматриваемый комплекс имеет функцию построения графиков зависимости интенсивности изнашивания от нужного параметра.

На рисунке 3.22. представлена схема тарировки датчика износа. Данная схема применяется, когда отсутствуют данные по тарировочному коэффициенту. Он объединяет величины поступающего сигнала и износа сопряжения. Тарировка датчиков износа производится в диапазоне от 0 до 1мм с одинаковыми промежутками, следующим способом: на одной оси устанавливается микрометрический винт (4) и часовой индикатор (1), так, чтобы тензобалка была прижата к держателю колодки. Изменение показаний датчика износа происходит при создании прогиба тензобалки, путем вращения винта. Компьютер считывает сигнал с тензодатчика, а значение прогиба балки вводится вручную.

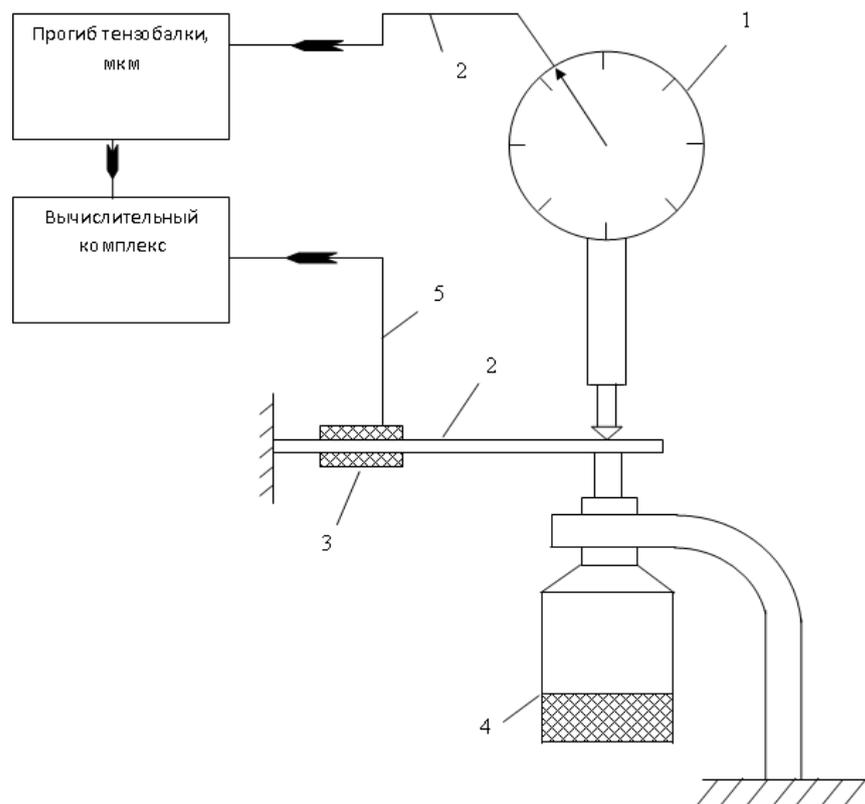


Рисунок 3.22 Схема тарировки датчиков износа

В результате, по полученным данным, можно вычислить значение сигнала тензодатчиков, используя метод наименьших квадратов:

$$U = a + b \cdot H, \text{ мВ} \quad (3.45)$$

где a , b – тарировочные коэффициенты полинома;

H – значение прогиба, мкм..

Согласно вышеописанному, погрешность измерения износа будет вычисляться следующим образом:

$$\Delta W = \frac{1}{k \cdot m} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n \sqrt{(\bar{U}_i - U_j)^2}, \quad (3.46)$$

\bar{U}_i – усредненное показание тензодатчика с i -ым шагом тарировки, мВ;

U_j – показание датчика при параллельных измерениях с i -ым шагом тарировки, мВ;

k – коэффициент тарирования, при оптимальных условиях $k=b$;

m – количество шагов;

n – количество одновременно проведенных опытов.

В результате проведения эксперимента погрешность измерения составила $\Delta W=0,2$ мкм. Исходя из этого, можно сделать вывод: для получения суммарного износа триботехнической пары не менее 2 мкм, необходимо получить показатели погрешности не более 10%.

Устройство зарегистрировано Патентом РФ на полезную модель [69].

Определение оптимальных условий реализации режима пониженного трения в сопряжении «шкворень-втулка»

Давление на узел, концентрация смазочных материалов, материал трущихся деталей, все это влияет на работу узла в режиме пониженного трения. Определение оптимальных условий реализации пониженного трения является важнейшим вопросом при улучшении качества работы триботехнической системы. В качестве испытуемых материалов были выбраны сталь (ролик) и бронза(колодка).

Для определения оптимальных условий сначала необходимо вычислить интенсивность изнашивания, путем аппроксимации полиномиальной модели первого порядка:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot N + b_2 \cdot C, \text{ мкм/мин} \quad (3.47)$$

где N – значение нагрузки при контакте, Н;

C – скорость при контакте, км/мин [83].

В таблице 3.5 указаны необходимые значения уровней меняющихся факторов. Был проведен полнофакторный эксперимент второго порядка для определения величин коэффициентов уравнения (3.47).

В таблице 3.6 представлена матрица планирования и экспериментальные данные.

Таблица 3.5 Показание значений варьируемых факторов

Значения варьируемых факторов	Обозначение	Нагрузка, Н	Скорость, м/мин.
		X_1	X_2
Основной уровень	0	350	0,5
Нижний уровень	-1	250	0,3
Верхний уровень	+1	450	0,7
Интервал варьирования	ΔX_i	100	0,3

Таблица 3.6 Матрица планирования эксперимента и экспериментальные данные

№ опыта	X_0	X_1	X_2	$X_1 \cdot X_2$	Y_1	Y_2
1	+	-	-	+	$0,42 \cdot 10^{-6}$	$0,39 \cdot 10^{-6}$
2	+	+	-	-	$0,28 \cdot 10^{-6}$	$0,30 \cdot 10^{-6}$
3	+	-	+	-	$0,25 \cdot 10^{-6}$	$0,27 \cdot 10^{-6}$
4	+	+	+	+	$0,15 \cdot 10^{-6}$	$0,18 \cdot 10^{-6}$

Усредненное число параметров оптимизации по опытам, выполняемым одновременно, можно вычислить следующим образом:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij}, \quad (3.48)$$

где \bar{Y}_i - среднеарифметическое показание параметра оптимизации конкретного i -го опыта;

i, j – номера столбцов и строк ;

n – количество проведенных исследований.

Для вычисления дисперсии опытов, выполняемых одновременно, необходимо руководствоваться выражением:

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2. \quad (3.49)$$

Чтобы определить, возможно ли провести регрессионный анализ, необходимо рассчитать значение критерия Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (3.50)$$

где S_i^2 – предельно допустимый показатель дисперсии, при условии одновременного выполнения опытов;

N – число опытов.

Численное значение критерия Кохрена приводят к сравнению с табличными показателями, где знаменатель $f_2=N$, а числитель $f_1= n-1$, при $\alpha=0,05$ (α –уровень значимости). При соблюдении условия (3.51), гипотеза об однородности будет выполняться.

$$G_{\text{табл}} > G_p. \quad (3.51)$$

Тогда, дисперсию повторяемости исследований можно вычислить по выражению (3.52) а коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.53-3.55).

$$V^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2, \quad (3.52)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad (3.53)$$

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} y_i}{N}, \quad (3.54)$$

$$b_{il} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} x_{il} y_i}{N}. \quad (3.55)$$

Определение ошибки коэффициента регрессии при проведении полнофакторного эксперимента рассчитывается следующим образом:

$$S_{bi} = \frac{V}{\sqrt{N \cdot n}}. \quad (3.56)$$

При помощи критерия Стьюдента осуществляется контроль значимости коэффициентов, определяемыми по формуле [75]:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{bi}}, \quad (3.57)$$

где S_{bi} – значение ошибки коэффициента регрессии;

b_i – численное значение коэффициента регрессии.

При выполнении условия (3.58), коэффициент уравнения регрессии можно считать действительным:

$$t_{ip} > t_{\text{табл}}, \quad (3.58)$$

где $t_{\text{табл}}$, t_{ip} – табличные и расчетные численные значения критерия Стьюдента.

Применяя критерий Фишера (F_p), выполняется контроль правильности составленного уравнения регрессии [75]:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{V^2}, \quad (3.59)$$

S_{ad}^2 – дисперсия адекватности расчетов выражается в следующем виде:

$$S_{ad}^2 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - l}, \quad (3.60)$$

где $y_i - \hat{y}_i$ – показатели значения целевой функции (расчетное и экспериментальное);

l – число необходимых коэффициентов и уравнений.

Выдерживая условие (3.61), уравнение регрессии составлено верно.

$$F_p < F_{\text{табл}} \quad (3.61)$$

При проведении друг за другом мысленных, а затем уже выполненных исследований стремящихся к градиенту, может быть осуществлен метод Бокса-Уилсона (стремление к лучшей области) [75]. Эксперимент может быть повторен, в случае если, отклонения полученных данных в результате проведения исследований будут больше, чем ошибка адекватности. Полученное отклонение при выполнении условия (3.62), можно считать критерием достижения лучшей области [83].

$$\frac{(y_{pi} - y_{mi})^2}{V^2} \leq F_p, \quad (3.62)$$

где y_{pi} , y_{mi} – выполненное и мысленное численные значения параметра

оптимизации с i -ым шагом к оптимальной области.

При выполнении условия (3.63) достигается верхняя граница лучшей области. При выполнении данного условия вместе с (3.62) могут быть определены оптимальные границы рассматриваемых факторов [83].

$$y_{p\ i+1} - y_{pi} > 0, \quad (3.63)$$

где $y_{p\ i+1}$, y_{pi} – последующий и предыдущий шаги движения к лучшей области, выраженные в числовых значениях параметра оптимизации [83].

В таблице 3.7 представлены полученные данные уравнения регрессии и стадии к достижению лучшей области. Все этапы движения и определение границ рассматриваемых факторов, были вычислены при помощи компьютера, также как и вычисления по правильности расчетов коэффициента регрессии [83].

Таблица 3.7 Данные вычислений этапов движения к наилучшей области и уравнения регрессии

Последовательность этапов движения к оптимальной области	Факторы		интенсивность изнашивания, мкм/мин
	Нагрузка, кН	Скорость, м/мин.	
1. Условия планирования эксперимента: основной уровень интервал варьирования верхний уровень нижний уровень	35 15 45 25	0,5 0,3 0,7 0,3	
2. Уравнение регрессии	$Y=0,0000067-0,000000006 \cdot N-0,0000045 \cdot C$		
3. Шаг, с которым выполняется движения, кН	4,2	0,1	
4. Перечень опытов при движении к наилучшей области: 1 мысленный 2 мысленный 3 мысленный реализованный 4 мысленный реализованный 5 мысленный реализованный 6 мысленный реализованный	34 38 42 42 46 46 50 50 54 54	0,5 0,61 0,71 0,71 0,81 0,81 0,92 0,92 1,02 1,02	$0,2264 \cdot 10^{-6}$ $0,1708 \cdot 10^{-6}$ $0,1152 \cdot 10^{-6}$ $0,1090 \cdot 10^{-6}$ $0,5964 \cdot 10^{-7}$ $0,960 \cdot 10^{-7}$ $0,4055 \cdot 10^{-8}$ $0,70 \cdot 10^{-7}$ $0,5153 \cdot 10^{-7}$ $0,117 \cdot 10^{-6}$

Оптимальным диапазоном является по нагрузке

$$46 \leq N \leq 56 \text{ кН} \quad (3.64)$$

по скорости

$$0,91 \leq C \leq 1,05 \text{ м/мин} \quad (3.63)$$

Руководствуясь условиями и полученными данными, более высокая стойкость к изнашиванию и как следствие увеличение ресурса узла, а также обеспечение осуществления поверхности контакта при критических нагрузках, может быть достигнута при восстановлении узла методом ремонтной детали.

3.8. Выводы

1. Разработан технологический процесс для восстановления втулок узлов трения с применением композиционных материалов.
2. Полученные данные оценочных показателей по композиционным материалам, позволяют устанавливать более рациональные методы нанесения покрытия. Способ восстановления втулок шкворневого узла композиционными материалами имеет наилучшие показатели, чем напыление и находится на одном уровне с наплавочными методами. Покрытие из композиционного материала Ketron PEEK 1000 имеет более высокую твердость, чем остальные.
3. На основе анализа микроструктуры образцов можно сделать вывод о том, что полиэфиркетон имеет гораздо меньшую пористость нежели пластиковая втулка или бронзовая при одинаковом ресурсе работы.
4. В результате исследования было установлено: полиэфиркетон по сравнению с заводским пластиком и бронзой имеет высокую коррозионную стойкость и пористость, благодаря чему материал обладает эксплуатационными свойствами подшипников скольжения.
5. На базе заводской машины трения модели 20-70 СМТ-1 создано устройство для непрерывного снятия показаний износа поверхностей испытываемых образцов. Сокращение времени и получение высокой точности результатов было получено за счет обработки полученных данных на компьютере, сигнал на который подают тензодатчики установленные на комплекс. Устройство зарегистрировано Патентом РФ на полезную модель.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УЗЛАМ ТРЕНИЯ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

4.1. Разработка технологического процесса восстановления узлов трения

Восстановление рассматриваемого шкворневого узла началось с разработки карты технологического процесса шкворневого узла (табл. 4.1). При составлении карты было указано минимальное количество операций, которые обеспечат лучшее качество деталей, подлежащих восстановлению. Для каждой технологической последовательности был подобран оптимальный перечень инструментов и оборудования.

Основной частью восстановления шкворневого узла является механическая обработка втулки методом растачивания на токарно-винторезном станке. Исходя из расчетов в предыдущих главах диссертационного исследования, необходимо достижение шероховатости внутренней и внешней поверхности втулки в пределах $R_z = 20-60$ мкм. Технологический процесс восстановления начинается с механической обработки (расточивания) на токарном станке 1К-62 с использованием специальных резцов с пластинами из твердых сплавов (Т15К6, Т5К10, ВК6, ВК8).

Также, на токарно-винторезном станке с целью более длительного удержания внутри узла консистентной смазки, были выполнены пазы, глубиной 0,2 мм по всей длине втулки с шагом в 30 градусов.

Руководствуясь каким-либо пособием по восстановлению и ремонту автомобильных узлов и агрегатов, при возвращении им работоспособности, необходимо стремиться к наименьшим материальным, временным и трудовым затратам при обеспечении максимального ресурса работы. Чтобы грамотно подобрать способ восстановления механизма, необходимо выполнить тщательную дефектовку.

Виды дефектов: износ внутренней поверхности втулки с образованием конусности, образование на шкворне механического износа.

Способ устранения дефекта: восстановление поверхности шкворня, замена

элемента.

Выбранный способ устранения дефекта напрямую зависит от такого параметра как коэффициент долговечности.

Таблица 4.1 Карта технологического процесса восстановления шкворневого узла

№п/п	Содержание работ	Исполнитель	Нормативные документы	Оборудование, инструмент	Трудоемкость, чел-мин	Технические условия
1	Постановка автомобиля на смотровую яму	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция №17 по охране труда при вывешивании автомобиля и работе под ним ТОИ Р-200-17-95	Яма смотровая	5	Установить автомобиль на яму, загонщик включает стояночный тормоз, ставит коробку передач в нейтральную передачу.
2	Установить противооткатные упоры под заднюю ось	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Противооткатные упоры	2	Установить противооткатные упоры под заднюю ось, упоры должны соответствовать ширине колеса.
3	Вывешивание передней части автомобиля	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Канавный домкрат	7	При вывешивании передней части автомобиля домкрат устанавливать четко под балку, чтобы избежать перекоса автомобиля
4	Съем передних колес	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Пневматический или электрический гайковерт, приспособление для демонтажа ступицы с колес	12	Соблюдение техники безопасности при съеме колес и оборудованием
5	Демонтаж тормозных суппортов	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Пневматический или электрический гайковерт, ключи, приспособление для демонтажа суппортов, гидравлическая тележка	25	Соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием и ручным инструментом
6	Съем ступиц в сборе с подшипниками	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Ступичный ключ, приспособление для съема ступиц	25	Соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием и инструментом
7	Демонтаж рулевых наконечников	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Съемник рулевых наконечников, молоток	22	Соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием и инструментом
8	Съем шкворней	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Приспособление для выпрессовки для шкворневых пальцев, ключи	60	Соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием и инструментом

Продолжение таблицы 4.1

9	Демонтаж цапф	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Тележка	10	Соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием и инструментом
10	Мойка деталей	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Ванна с содовым раствором	10	Соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием и инструментом
11	Дефектовка деталей	Автослесарь 4 разряда, диагност	ТУ на дефектовку деталей ходовой части	Измерительные инструменты(микрометр, нутромер, штангенциркуль)	20	Соблюдение техники безопасности при работе с измерительным инструментом
12	Шлифовка шкворня	Автослесарь 4 разряда, диагност	ТУ на шлифовку деталей	Кругло-шлифовальный станок, поводковый патрон с поводком, центрами, шлифовальный круг	30	Шкворень шлифовать до ближайшего ремонтного размера и получения поверхности с шероховатостью не более Rz=120
13	Изготовление новой втулки	Автослесарь 4 разряда, диагност	ТУ на токарную обработку деталей	Токарный станок, поводковый патрон с поводком, центрами. Проходной, расточной и отрезной резцы, штангенциркуль, микрометр	40	Точить деталь с проходом резца не более 2 мм на сторону. Скорость обработки 650 об/мин. Соблюдение техники безопасности при работе с измерительным инструментом, станком и режущим инструментом.
14	Виброобкатка на внутренний диаметр втулки	Автослесарь 4 разряда, диагност	ТУ на вибрационную накатку деталей	Виброголовка, токарный станок, измерительный инструмент	25	Вибрационную накатку производить при скорости вращения детали 560 об/мин. Выставить усилие тарированной пружины 130кг. Амплитуда синусоиды 0,75 мм. Накатку производить при автоматической подаче. Соблюдение техники безопасности при работе с измерительным инструментом, станком и режущим инструментом.
15	Установка деталей в обратной последовательности на автомобиль	Автослесарь 4 разряда, диагност	Типовая инструкция по охране труда	Динамометрический ключ, пневматический или электрический гайковерт, ключи, приспособление для монтажа суппортов, гидравлическая тележка	340	Соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием и ручным инструментом
16	Проверка и регулировка схождения	Автослесарь 4 разряда, диагност	ТУ на проверку и регулировку углов схождения	Лазерный стенд	50	Соблюдение техники безопасности при работе с высокоточным оборудованием

Определение коэффициента долговечности

От влияния эксплуатационных свойств при восстановлении различными способами зависит долговечность изделий. На основе многолетнего опыта эксплуатации транспорта, в области грузоперевозок, можно выделить 3 основные причины потери работоспособного состояния:

- низкий коэффициент износостойкости материалов;
- низкий коэффициент прочности контакта сопрягаемых деталей;
- подверженность материалов к высоким усталостным нагрузкам при высоком давлении на них.

Долговечность восстановления работоспособного состояния деталей определяется таким параметром как коэффициент долговечности - K_d . Данный коэффициент может быть выражен как функция вышеописанных причин.

$$K_d = f(K_{сц}, K_{из}, K_v), \quad (4.1)$$

где $K_{из}$ - коэффициент износостойкости;

$K_{сц}$ - коэффициент сцепления;

K_v - коэффициент выносливости.

В процессе исследования было выявлено отсутствие факторов, ответственных за ресурс контактирующих поверхностей в шкворневых узлах рассматриваемых автомобилей. Следовательно, можно констатировать отсутствие влияния коэффициента выносливости на K_d . При этом, может наблюдаться несовпадение максимальных и минимальных интенсивностей сопряжения во время проведения эксперимента.

В таблице 4.2 представлены расчетные данные, которые необходимы для выбора оптимального режима восстановления с учетом областных ограничений.

Исходя из табличных данных, можно принять оптимальный режим восстановления, при котором показатели будут равны: $P=335\text{МПа}$, $t=143^\circ\text{C}$, $T=1,6$ час, при $R_z=170$ мкм, $T_{сц}=337\text{МПа}$, $I=0,00675$ мм/час.

Таблица. 4.2 Данные полученные для выбора режима восстановления

Показатели функции			T _{сш} , МПа	I, мм/час
t°С	T, час	P, МПа		
132	1,3	356	347	0,007
157	1,8	313	326	0,0065

Поскольку базовый коэффициент существенно ниже коэффициента прочности при оптимальном режиме работы сопряжения, то коэффициент износостойкости будет равен коэффициенту долговечности. В числовом значении он будет равен $K_d=1,5$.

Исходя из каталогов деталей на рассматриваемые автомобили, втулка имеет номер 55-31-318, а палец 55-31-309. Анализируя среднестатистические данные рассматриваемого предприятия ООО «Арко-Турс», на базе которого проводились эксперименты, выход из строя шкворневого узла произойдет на 110000 км. К сожалению, автомобилю с данным пробегом не предусмотрен ни один вид ТО. Процесс восстановления побудит снять автомобиль с линии. Избежать этого и повысить коэффициент долговечности поможет использование предложенного материала- полиэфиркетона.

$$110000 \times K_d = 110000 \times 1,5 = 165000 \text{ тыс.км.} \quad (4.5)$$

Полученный ресурс данного сопряжения совпадает с ремонтным циклом автомобилей Scania R серии или Volvo FH серии.

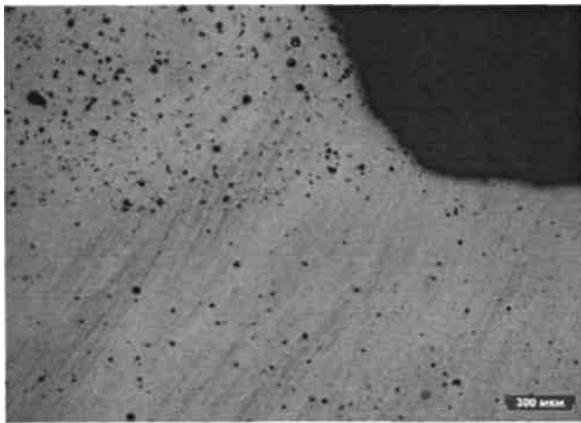
Исследование структуры покрытия из полиэфиркетона

Для проведения анализа структуры покрытия втулки из полиэфиркетона производим изготовление образца в режиме, оптимальном с точки зрения долговечности покрытия. Наиболее долговечное покрытие получается при следующем режиме: $P=335 \text{ Мпа}$, $t=143^\circ\text{C}$, $T=1,6$ час, при $R_z=170$ мкм. После изготовления, разрезаем образец на сектора, тем самым охватывая зону перехода. Уже на данной стадии видно, что цвет и структура покрытия идентична с изготовленной бронзовой втулкой для испытаний.

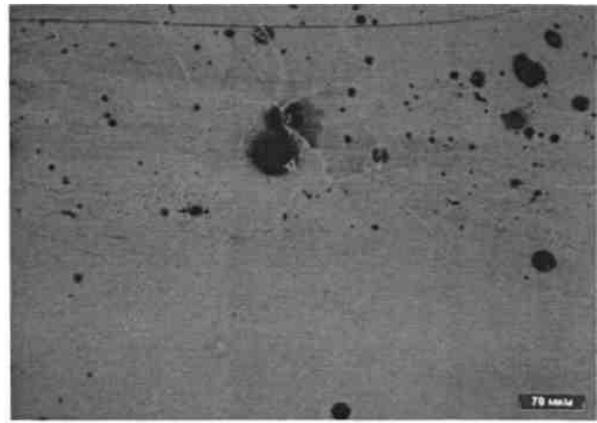


Рисунок. 4.1 Образец для испытаний

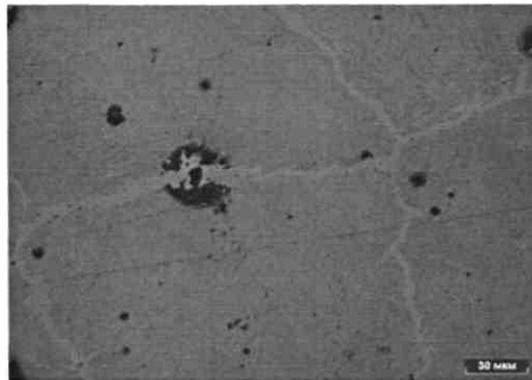
При помощи электронного микроскопа была исследована структура материалов в переходной зоне. Снимки были выполнены и 50-, 200-, и 500-кратном увеличении (рис. 4.2).



50-кратное



200-кратное



500-кратное

Рисунок. 4.2 Структура исследуемых материалов в переходной зоне

Рассмотрев выполненные снимки, можно констатировать нечеткую переходную зону из-за диффузии в ней углерода и цинка. Поэтому, прочность сцепления имеет высокие численные показатели.

На основе вышеизложенного, можно сделать вывод, о схожести численных значений экспериментальных данных (пористость, твердость, микротвердость, коррозионная стойкость) с реальными, когда втулки были установлены на автомобиль. Поэтому, физико-механические свойства рассматриваемого материала- полиэфиркетона соответствуют всем требуемым эксплуатационным условиям.

4.2. Оптимизация параметров технологического процесса и определение технологической себестоимости замены детали

Модель рассматриваемой системы формируется с помощью ограничений в форме равенств и неравенств, критерия эффективности и ряда переменных. Упоминание о значимости большей части показателей процесса следует иметь ввиду при определении критерия эффективности. Один из самых распространенных вторичных критериев, тот, который носит экономический характер. Он, как и все вторичные критерии, выполняет роль установщика границ от максимального до минимального уровня показателей, которые им характеризуются.

Технологическая себестоимость процесса ($C_{сп}$) является критерием эффективности при выборе операций при выполнении процесса восстановления узла. Выбор данного критерия эффективности объясняется постоянством производительности при восстановлении на различных нагрузочных режимах [10].

В результате выбранных критериев, задаем следующие исходные данные для дальнейших расчетов:

$P_m = 487$ г/ч - технологическая производительность процесса

$P_1 = 383$ г/ч- действительная производительность

$N_n = 2,8$ кВт - полезная мощность

$K_1 = 100,5$ г/кВт-ч - энергопроизводительность оборудования

$K_2 = 178$ г/кВт-ч - энергопроизводительность процесса

$N_{тех} = 5$ кВт - технологическая мощность

С учетом заданных данных по формуле (4.6) вычисляем технологическую себестоимость [10].

$$C_{сн} = G \cdot \left(\frac{C_1}{\Pi_1} + \frac{C_2}{K_1} + \frac{C_3}{\Pi_T} \right) \rightarrow \min, \quad \text{где} \quad (4.6)$$

C_1 - сумма затрат в час по з.п., ТО и Р, а также амортизацию оборудования;

$$C_1 = \text{зарплата} + \text{амортизация оборудования} + \text{ремонт оборудования} \quad (4.7)$$

$$C_1 = 127 \text{ р.} + 147 \text{ р.} + 59 \text{ р.} = 333 \text{ р.},$$

где А - амортизация оборудования в час, руб [57];

Р - отчисления на ремонт оборудования в час, руб [57];

Численное значение стоимости оборудования задаем = 750000 р., при амортизации 0,15 от стоимости в месяц.

Соответственно часовая амортизация = 147 р. в час [57].

Отчисления на ремонт оборудования принимаются как 40% от амортизации оборудования Р=59 р.

C_2 — затраты электроэнергии;

C_3 - сумма затрат в час на инструмент, оборудование и материалы.

Массу материала можно вычислить согласно формуле:

$$G = G_m a = 48 \text{ г.}, \quad (4.8)$$

где а - коэффициент полезного использования материала а=0,97.

Определяем часовую зарплату рабочего:

$$ЗП_{ч} = (ЗП_{мес} / t_{сргод}) * K_{от} * K_{сф} \quad (4.9)$$

где $ЗП_{мес}$ - средняя заработная плата рабочего в месяц (прин. 35000 руб);

$t_{сргод}$ - средняя продолжительность рабочего времени в месяц (165,6 ч);

$K_{от}$ — отраслевой коэффициент ($K_{от}=1,1$);

$K_{сф}$ - отчисления в соц. фонд (26%) $K_{сф}=1,26$;

$C_3=14,34$ р (при стоимости кетона 9000 руб/кг и партии в 100шт)

Полезная мощность вычисляется как:

$$N_n = Q_H / T_H \quad (4.10)$$

Количество затраченного тепла:

$$Q = C \cdot M \cdot (t_K^{\circ} - t_{\text{нач}}^{\circ}), \text{ где} \quad (4.11)$$

где C — теплоемкость, равная 0,7;

M - масса изделия.

Получив все необходимые данные, вычисляем технологическую себестоимость:

$$C_{Cn} = 50 \left(\frac{324}{0,8 \cdot \frac{50 \cdot 100}{T_o}} + \frac{3}{0,57 \cdot \frac{0,6 \cdot (50 + 100) \cdot t^{\circ} C}{T_o}} + \frac{14,36}{\frac{50 \cdot 100}{T_o}} \right)$$

$$C_{Cn} = m \left(\frac{324}{\eta_t \cdot \frac{m \cdot n}{T_o}} + \frac{3}{\eta_n \cdot \frac{c \cdot (m + M) \cdot t^{\circ} C}{T_o}} + \frac{14,34}{\frac{m \cdot n}{T_o}} \right), \quad (4.12)$$

$$C_{Cn} = 4,05 T_o + 855 \frac{T_o}{t^{\circ}} + 0,0028 T_o$$

Также, необходимо вычислить минимальную себестоимость процесса восстановления. Вычисление производим по формуле (4.13), методом геометрического программирования [6].

$$q_o^* = \left[\frac{C_1}{C_1(1-r_1-r_2)} \right]^{1-r_1-r_2} \left(\frac{C_2}{r_1 G_2} \right)^{r_1} \left(\frac{C_3}{r_2 G_3} \right)^{r_2} \quad (4.13)$$

Задав все ограничения производительности оборудования, выводим численное значение минимальной себестоимости:

$$G_1 = 400 \text{ г/ч}$$

$$G_2 = 200 \text{ г/кВт·ч}$$

$$G_3 = 500 \text{ г/ч}$$

$$\frac{1-r_1-r_2}{r_1} = \frac{C_1 G_2}{G_1 C_2} = \frac{324,9 \cdot 200}{400 \cdot 3} = 54$$

$$\frac{1-r_1-r_2}{r_2} = \frac{C_1 G_3}{G_1 C_3} = \frac{324,9 \cdot 500}{400 \cdot 14,34} = 28,2$$

При расчете полученных данных получаем: 1грамм полиэфиркетона= 8,042рублей.

$$0,01757=r_1$$

$$0,03364=r_2$$

$$q_o^* = \left[\frac{324,9}{324,9(1 - 0,01757 - 0,03364)} \right]^{1-0,01757-0,03364} \left(\frac{3}{0,01757 \times 200} \right)^{0,01757} \times \left(\frac{14,34}{0,03364 \times 500} \right)^{0,03364} = 8,042 \text{ p / zp}$$

Зная минимальную себестоимость грамма материала, можно посчитать себестоимость изготовления полиэфиркетоновой втулки по формуле:

$$C_{\text{сп}} = G * q_o = 48 * 8,042 = 386 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

Чтобы определить значения температуры и времени, необходимо подставить полученное значение технологической себестоимости в выражение (4.12). Необходимо не переводить полученные данные в безразмерные единицы. Для этого воспользуемся программой Mathcad. Полученные значения в результате вычислений, с учетом максимальных и минимальных границ, составили: $C_{\text{сп}} = 386 \text{ руб.}; t = 115^\circ\text{C}; T = 2 \text{ час}$.

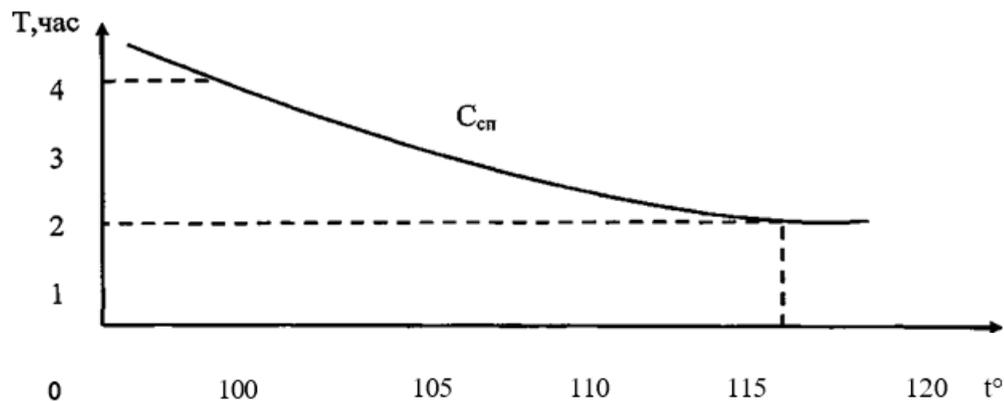


Рисунок.4.3 Значение оптимальной технологической себестоимости

График технологической себестоимости изображен на рисунке 4.3 и отражает полученные численные данные ограничений по температуре и времени.

Исходя из полученных ранее выражений, мы можем произвести расчёт действительной (4.15) и технологической производительностей (4.16):

$$P_T^* = \frac{m \cdot n}{T^*} = \frac{50 \times 100}{8,5} = 588,2 \text{ г/ч} \quad (4.15)$$

$$P^* = P_T^* \cdot n_T = 588,2 \times 0,8 = 470,6 \text{ г/ч} \quad (4.16)$$

Приграничных условиях:

$$100 < t^0 < 115;$$

$$8,5 < T_0 < 10,5,$$

(при $T_H=0,5$ ч. = const; $T_{ок}=6$ ч. = const; 2 ч. $< T_{вып} < 4$ ч.)

По аналогии рассчитывается и удельная энергопроизводительность оборудования (K_1) и процесса (K_2): $K_1=118$ г/кВт'ч; $K_2=210$ г/кВтч.

Согласно выражению (4.17), мы можем определить себестоимость расточки полиэфиркетоновой втулки, с учетом того, что изменение себестоимости незначительна и принимается как постоянная величина.

$$C_{\text{раст}} = C_{\text{эл}} + C_{\text{э}} + C_{\text{д}} + C_{\text{р}} \quad (4.17)$$

$$C_{\text{эл}} = 3P^* \cdot T_{\text{шт}}(\text{расточки}) = 125,4 \cdot 0,255 = 32 \quad (4.18)$$

Затраты на электроэнергию вычисляем следующим образом:

$$C_{\text{э}} = \frac{N_{\text{тех}} \cdot C_{\text{тех}} \cdot t_0}{60} = \frac{6,21 \cdot 3 \cdot 11,3}{60} = 3,5 \text{ руб.} \quad (4.19)$$

где $N_{\text{тех}}$ - технологическая мощность станка, $N_{\text{тех}}=8$ кВт

$$C_{\text{а}} = \frac{H_{\text{а}} \cdot C_{\text{об}} \cdot T_{\text{шт}}}{\Phi_{\text{г}} \cdot 60} = \frac{0,15 \cdot 400000 \cdot 15,3}{2040 \cdot 60} = 7,5 \text{ руб.} \quad (4.20)$$

где $H_{\text{а}}$ - коэффициент амортизационных отчислений, $H_{\text{а}}=0,15$;

$C_{\text{об}}$ - балансовая стоимость оборудования, руб.;

$\Phi_{\text{г}}$ - годовой фонд работы оборудования, час.

Затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования:

$$C_{\text{р}} = \frac{\beta \cdot C_{\text{об}} \cdot T_{\text{шт}}}{\Phi_{\text{г}} \cdot 60} = \frac{0,05 \cdot 400000 \cdot 15,3}{2040 \cdot 60} = 2,5 \text{ руб.} \quad (4.21)$$

где β - коэффициент отчислений на ремонт и ТО оборудования, $\beta=0,05$

$C_{\text{об}}$ - стоимость оборудования, руб.;

$\Phi_{\text{г}}$ - годовой фонд использования оборудования, час

$$C_{\text{раст}} = 32 + 3,5 + 7,5 + 2,5 = 45,5$$

Затраты на производство втулки рассчитываем аналогично:

$$C_{\text{э}} = \frac{3,75 \cdot 3 \cdot 0,8}{60} = 0,15 \text{ руб.} \quad (4.22)$$

Затраты на амортизацию оборудования составят:

$$C_{\text{а}} = \frac{0,15 \cdot 500000 \cdot 3,2}{426 \cdot 60} = 9,4 \text{ руб.} \quad (4.23)$$

Расходы на техническое обслуживание и ремонт составят:

$$C_p = \frac{0,05 \cdot 500000 \cdot 3,2}{426 \cdot 60} = 3,1 \text{ руб.} \quad (4.24)$$

С учетом всех вычислений, оптимальное значение технологической себестоимости при восстановлении полиэфиркетоновой втулки будет равно:

$$C_{тс} = 68,65 + 8,042 \times 48 = 454,6 \text{ руб.}$$

Значения шероховатости и давления =const

Таблица 4.3 Допуски на переменные в зависимости от расчетных данных

	Показатели				Технологическая себестоимость, руб.
	Rz, мкм	P, МПа	T, час	t°C	
Расчетные данные	170	360	2	115	454,6
Допуски на управляемые переменные	8	17,5	0,1	57,5	6

В итоге, можно сделать вывод, что расчётные значения для шкворневого узла автомобилей Scania R серии и Volvo FH серии, с применением полиэфиркетона при ремонте составит: $C_{тс} = 454,6$ руб.; прочность сцепления с основой $T_{сц} = 80...84$ МПа; интенсивность изнашивания $I = 0,0070...0,0074$ мм/час.

4.3. Эксплуатационные испытания сопрягаемых поверхностей

Эксплуатационные испытания шкворневых узлов (правого и левого) проводились в ООО «Арко–Турс». Поверхности шкворней (их геометрические формы) были восстановлены до ближайшего ремонтного размера. Заводские втулки из пластика (Scania R серии) и бронзы (Volvo FH серии) были заменены на изготовленную из полиэфиркетона.

Восстановленные триботехнические соединения были установлены на грузовые автомобили марок Scania R серии и Volvo FH серии, с общим количеством восстановленных сопряжений 2(два), по два сопряжения на

автопоезд на 16 июня 2018 года.

За период наблюдений наработка автопоездов составила 240 тыс.км. на единицу, при износе на одну сторону: шкворня две тысячные миллиметра, а втулки четыре тысячные миллиметра, что полностью соответствует требованиям к эксплуатации.

Методика проведения и результаты испытаний.

С целью проведения экспериментальных испытаний были выбраны грузовые автомобили с отремонтированными шкворневыми узлами, имеющие одинаковые условия эксплуатации и закрепленные за квалифицированными водителями.

Перед началом, данным автомобилям было выполнено ТО2 в полном объеме с заменой шкворневого узла и применением втулки из полиэфиркетона.

Эффективность проведенных мероприятий оценивалась путем сравнения узлов со втулками из полиэфиркетона и штатными втулками из бронзы (БрОЦС5-7-12) .

В процессе работы автомобиля в шкворневом узле образуется большое количество загрязнений, находящихся в консистентной смазке. Определить состав отложений, их количество, являются ли они продуктами износа деталей, позволяет спектральный анализ консистентной смазки. Данный анализ производится путем сжигания смазки в очаге электрической дуги.

Также можно оценить степень износа сопряжения при работе с помощью спектральных линий для определенного изделия. Так, чтобы сравнить эффективность работы рассматриваемого триботехнического соединения на заводской смазке, был выполнен спектральный анализ по химическим элементам, таким как: свинец, хром, олово, медь, железо, алюминий.

Изменение интенсивности спектральных линий частиц износа в смазке от величины пробега с начала испытаний для втулок из заводской бронзы и полиэфиркетона показаны на рисунке 4.4.

Анализируя данный график можно сделать вывод, что при работе полиэфиркетона с заводской смазкой происходит накопление основных частиц

износа в начале эксплуатации (что характеризуется мгновенным увеличением спектральных линий). После этого скачка, на оставшееся расстояние до окончания наблюдений ресурс втулки происходит незначительное накопление частиц износа.

При работе заводской втулки из бронзы со штатной смазкой, накопление продуктов износа происходит линейно. Однако, после прохождения половины заданного расстояния при эксперименте, происходит существенный рост спектральных линий, что характеризуется ослаблениями смазочных свойств и наличием большого количества продуктов износа в смазке.

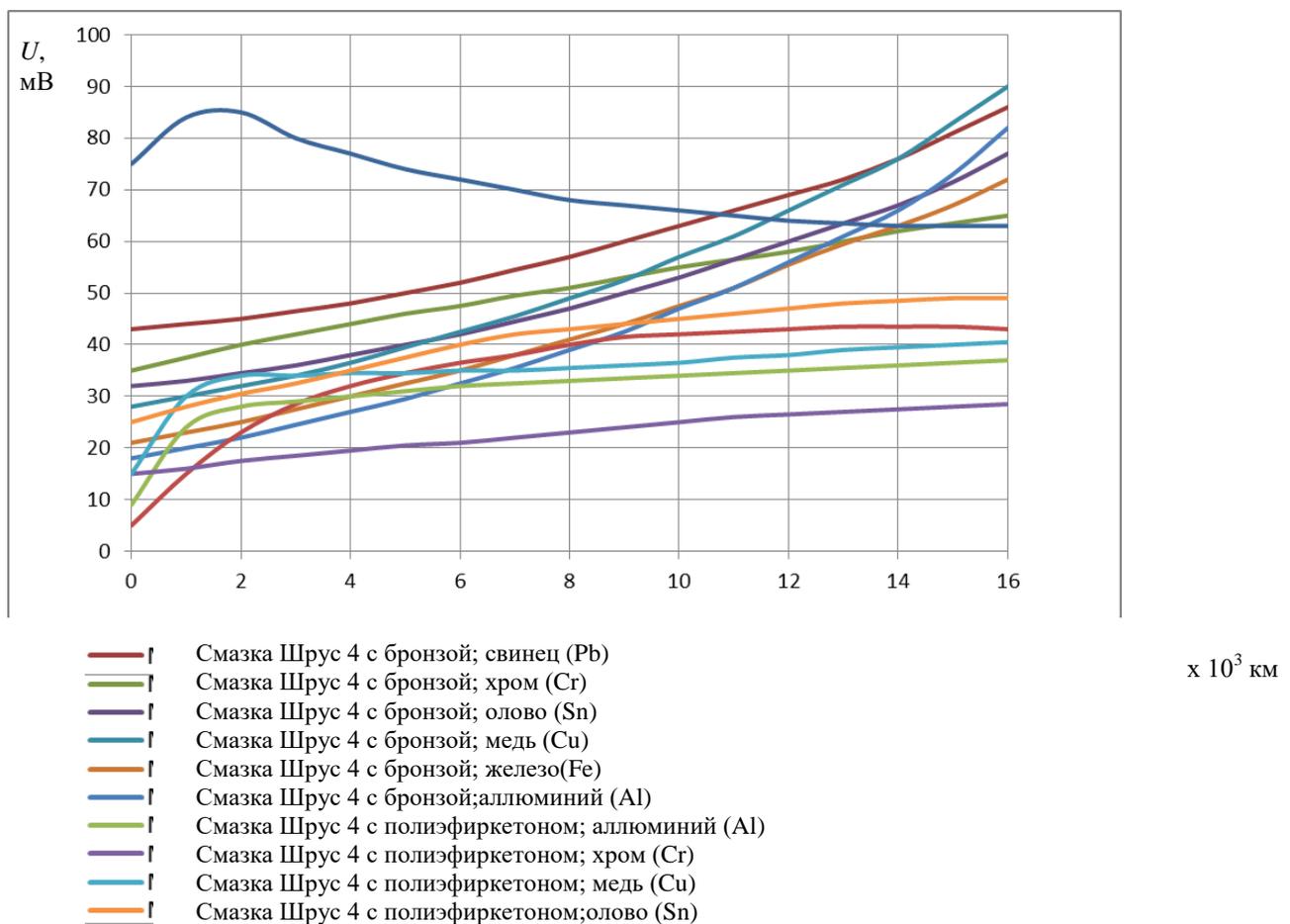


Рисунок 4.4 Изменение интенсивности спектральных линий частиц износа в смазке от величины пробега с начала испытаний

В итоге, анализ построенных спектральных линий показал, что процесс накопления продуктов износа в шкворневых узлах, работающих со втулкой из полиэфиркетона в 1,4 (для *Fe*) – 2,8 (для *Cr*) раза ниже, чем на номинальных шкворневых узлах.

4.4. Определение условного ресурса сопряжения

Нагружение прирабатываемого соединения производится в процессе активной работы. Момент сопротивления на шкворне будет определять нагруженность подвижных сопряжений, в том числе и втулки.

В качестве расчетной схемы нагрузки на втулку на рисунке 4.5, шкворень

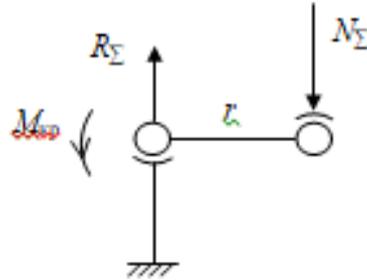


Рисунок 4.5 Расчетная схема нагрузки на втулку

Крутящий момент при этом будет определяться по формуле [57]:

$$M_{кр} = N_{\Sigma} \cdot r, \quad (4.25)$$

где $M_{кр}$ – индикаторный крутящий момент, Н·м;

N_{Σ} – сумма всех сил действующих на крайние точки шкворня в такте «рабочего хода»;

r – радиус кривошипа.

Для реализации r при приработке втулок шкворневого узла необходимо обеспечить их работу в нужном диапазоне давлений от 2,6 до 3,4 Мпа [57].

Для оценки скорости приработки шкворневого узла с помощью профилографа была выполнена профилограмма поверхностей трения (рисунок 4.6). Зафиксированные параметры шероховатости поверхности втулок были занесены в таблицу 4.4.

Результаты профилографического исследования поверхностей трения втулок шкворневого узла показывают, что приработка триботехнических сопряжений произойдет на треть быстрее, чем по техническим условиям на капитальный ремонт.

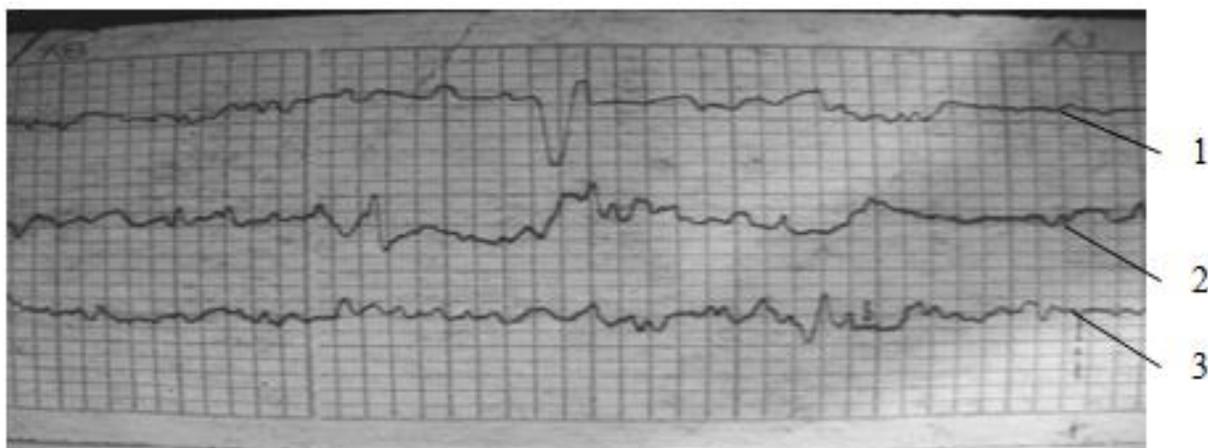


Рисунок 4.6 Профилограммы узлов трения
1-до приработки; 2 –после приработки по ТУ на КР; 3- после приработки с использованием полиэфиркетона на рекомендуемых режимах

Таблица 4.4 Параметры шероховатости поверхностей втулок шкворневого узла

Поверхность втулки	Параметры шероховатости					
	R_a	R_z	R_{max}	R_{σ}	S_m	R_z/R_{max}
До приработки	0,32	1,56	2,43	0,95	47,7	0,39
После приработки по ТУ на КР	0,25	1,22	1,95	0,72	103,9	0,37
После приработки с использованием полиэфиркетона на рекомендуемых режимах	0,19	0,93	1,49	0,51	162,7	0,34

4.5. Расчет экономического эффекта от внедрения способа восстановления узлов трения ходовой части транспортных средств изготовлением втулок из композиционных материалов

Основным критерием целесообразности внедрения в производство технологических новшеств является достижение весомой экономии денежных средств, при условии увеличения производительности и снижения себестоимости изготовления.

Очень важным фактором при восстановлении узлов и агрегатов является техническая эффективность нововведения. Этот фактор позволяет оценить надежность при эксплуатации автомобиля, а также сократить время простоя.

В таблице 4.6 приведены расчётные данные основных показателей, из

которых образуется экономический эффект до и после внедрения полиэфиркетоновой втулки.

Исходя из полученных данных, указанных в таблице 4.6., можно сделать вывод, что экономический эффект, полученный в результате снижения расходов на стоимость замены втулки шкворневого узла составляет 20390 руб. на один автомобиль. Общая экономия составит 2242900 руб. на весь парк автомобилей.

Таблица 4.6 Расчётные данные основных показателей до и после внедрения полиэфиркетоновой втулки.

Показатели	Единицы измерения	До	После
1	2	3	4
1. Исходные данные:			
1.1. Производственная программа ремонтов шкворневого узла, X_1	шт.	200	134
1.2. Трудоемкость замены шкворневого узла, X_2	чел.ч	2,80	2,80
1.3. Тарифная ставка слесаря- 4 раз., X_3	руб.	2500	2500
1.4. Время работы, X_4	ч	13,1	14,1
1.5. Ресурс отремонтированного шкворневого узла, X_{11}	тыс. км	110	165
1.6. Стоимость замены узла, X_{12}	руб.	57150	36760

4.6. Выводы

- 1) На основе проведенных исследований было установлено, что коэффициент прочности сцепления существенно выше базового, что позволило повысить ресурс данного узла до 165000 тыс. км. На данном пробеге, в соответствии с ремонтным циклом автомобилей Scania R серии или Volvo FH серии будет выполнен КР данного узла.
- 2) Результат исследования показал, что все рассмотренные свойства полиэфиркетона, изготовленного в оптимальном режиме, удовлетворяют требованиям эксплуатации, предъявляемым к представительным сопряжениям.
- 3) За период наблюдений наработка автопоездов составила 240 тыс.км, при износе на одну сторону: шкворня две тысячные миллиметра, а втулки

четыре тысячные миллиметра, что полностью соответствует требованиям к эксплуатации.

- 4) Результаты профилографического исследования поверхностей трения втулок шкворневого узла показывают, что приработка триботехнических сопряжений произойдет на треть быстрее, чем по техническим условиям на капитальный ремонт.
- 5) Экономический эффект, полученный в результате снижения расходов на стоимость замены втулки шкворневого узла составляет 2242900 руб. на все автомобили предприятия в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения ресурса автопоездов за счет увеличения долговечности узлов трения ходовой части (шкворневых узлов), путем использования композиционного материала с улучшенными свойствами – полиэфиркетона, получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Произведен анализ состояния вопроса восстановления шкворневых узлов композиционными материалами. На основе анализа и предыдущих исследовательских работ, нами была выдвинута гипотеза о применении полиэфиркетона в тяжело нагруженных узлах трения;

2. Проведен полнофакторный эксперимент с целью оценки влияния внешних факторов на интенсивность изнашивания узла. При выполнении математических расчетов и исследований было определено увеличение износостойкости узла более чем в 1,5 раза, за счет предложенного материала при оптимальных условиях работы сопряжения. Предложена математическая модель трения подвижных сопряжений узлов ходовой части транспортных средств с применением полиэфиркетона и доказана ее адекватность.;

3. Разработан технологический процесс восстановления узлов трения ходовой части транспортных средств с применением полиэфиркетона;

4. Создано устройство на базе машины трения мод. 2070 СМТ-1 для непрерывного снятия показаний износа поверхностей испытуемых образцов. Возможность минимизировать время и получить высокую точность результатов, была достигнута за счет обработки данных на компьютере, сигнал на который подавали тензодатчики, установленные на комплекс. Устройство зарегистрировано Патентом РФ на полезную модель;

5. Экономический эффект, полученный в результате снижения расходов на стоимость замены втулки шкворневого узла составляет 2242900 руб. на все автомобили предприятия в год при численности парка в 120 единиц;

6. На основе проведенных исследований коэффициент прочности сцепления существенно выше базового. При выполнении расчетов, связанных с долговечностью работы узла было выявлено, что на пробеге в 165 тыс.км.

произойдет прогнозируемый выход из строя данного узла. Полученный ресурс данного сопряжения совпадает с ремонтным циклом автомобилей Scania R серии и Volvo FH серии;

7. Разработана методика повышения долговечности шкворневых узлов трения, на основании которой в процессе проведения экспериментальных исследований при установке полиэфиркетоновой втулки на рассматриваемых марках грузовых автомобилей был выявлен ресурс сопряжения более чем в 1,5 раза выше, чем эксплуатируемый шкворневой узел на заводских втулках. При этом, за период подконтрольной эксплуатации наработка автопоездов составила 240 тыс. км, при износе на одну сторону: шкворня 0,002 мм, а втулки 0,004 мм, что полностью соответствует требованиям к эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др. Основы трибологии (Трение, износ, смазка). М.: Машиностроение, 2001. – 663 с.
2. Адаскин А.М. Материаловедение (металлообработка)/ А.М.Адаскин, В.М.Зуев. – М.: Изд-ий центр Академия, – 2013. – С. 52-62.
3. Акопов В.А.,Строков В.Л. Процессы надежности автомобильных двигателей. Ташкент,- 1990, -136 с.
4. Аксенов А.Ф., Лозовский В.Н. Износостойкость упрочненных трущихся поверхностей. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
5. Андреева А.Г., Бурумкулов Ф.Х., Толоконников В.И. и др. Финишная антифрикционная безабразивная обработка как средство повышения срока службы машин и оборудования. Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 4. – М.: Машиностроение, 1990, с. 34-59.
6. Андреев М.А. Способ регулирования пневмогидравлической подвески многоосного транспортного средства с изменяемой упругой характеристикой. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана.
7. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А.В. Белого, Н.К. Мышкина; Под ред. А.И. Свириденко. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
8. Белый В.А. Трение и износ : Международный научный журнал. — Гомель: Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, 2004. — Т. 25, № 4. — С. 343.
9. Богодухов С.И. Курс материаловедения в вопросах и ответах/ С.И.Богодухов, А.В.Синюхин, В.Ф.Гребенюк. – М.: Изд-во Машиностроение, - 2014.- С. 212-231.
10. Борнацкий И.И. Основы физической химии: учебник. – М.: Металлургия, 1989. – 320 с.

11. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Трение и изнашивание в машинах. – М.: Машиностроение, 1982. – 190 с.
12. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1987. – 223 с.
13. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 126 с.
14. Валитов А.М. Приборы и методы контроля толщины покрытий. М., Машиностроение,- 1970, -120 с.
15. Васильева Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы: Учеб. для вузов. Изд. 2-е / Л.С. Васильева – М.: Наука-Пресс, 2004. – 421 с.
16. Власов В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
17. Воронков Б.Д., Щадрин В.Г. Повышение долговечности химического оборудования методом избирательного переноса при трении. – В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988, вып. 3, с.195 – 228.
18. Гаевик Д.Т. Повышение работоспособности подвижных сопряжений автомобилей. М.: 2001. – 247 с.
19. Гаркунов Д.Н. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение,- 1987, -304 с.
20. Гаркунов Д.Н. Материалы, работающие в режиме избирательного переноса. Общие сведения. – В кн.: Повышение износостойкости на основе применения избирательного переноса. – М.: Машиностроение, 1977. – с.99 – 107.
21. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов [Текст] / Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд-во МСХА, 2004. – 384 с.
22. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «Издательство МСХА», 2001. 616 с., ил. 280.
23. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

24. Гольд Б.В. Прочность и долговечность автомобиля. М., Машиностроение,- 1974, -328 с.
25. ГОСТ 27674 – 88 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. Государственный стандарт Союза ССР.
26. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Взамен ГОСТ 2789-59; введ. 01.01.75. – М.: Стандартиформ, 2006. – 7 с.
27. Громаковский Д.Г., Куксенова Л.И. Разработка средств повышения эффективности избирательного переноса в тяжело нагруженных соединениях. – В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1986, вып. 2, с.31 – 43.
28. Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие/Под общей редакцией Н.Е.Денисовой. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 248 с.
29. Долговечность трущихся деталей машин: Сб. статей. Вып.2 / Под ред. Гаркунова Д.Н. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
30. Дроздов и др. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
31. Дроздов Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях., - Машиностроение,- 1986, -224 с.
32. Дроздов Ю.Н., Арчegov В.Г., Смирнов В.И. Противозадирная стойкость трущихся тел. – М.: Наука. 1981. – 138 с.
33. Дякин С.И., Филатов Т.П. Некоторые концепции применения материалов в тяжело нагруженных трибосопряжениях. – В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1986, вып. 2, с.19 – 31.
34. Евдокимов Ю.А. и др. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 228 с.

35. Заплатин В.Н. Основы материаловедения / В.Н. Заплатин, Ю.И. Сапожников, А.В. Дубов –Изд-во: Академия, -2012.- 256 с.
36. Запольский Н.В. Износ и восстановление деталей судовых двигателей внутреннего сгорания. М.: «Транспорт»,- 1965, -132 с.
37. Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. — М.: Химия, 1991. — 240 с.
38. Злобин В.Г., Горбай С.В., Короткова Т.Ю. Техническая термодинамика. Часть 1. Основные законы термодинамики. Циклы тепловых двигателей: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб.: 2011. – 149 с.: ил. 52.
39. Зорин В.А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
40. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Под общ. ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1982. – 207 с.: ил.
41. Камбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М., «Наука»,- 1974, -103 с.
42. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М., Машиностроение,- 1978, -213 с.
43. Кириченко Н.Б. Автомобильные эксплуатационные материалы: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образование/Н.Б.Кириченко. – 8-е изд., стер. – М: Издательский центр «Академия», 2012. – 208 с.
44. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / В.С. Комбалов; под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. – М.: Машиностроение, 2008. – 384 с.
45. Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Под общ. ред. Чайнова Н.Д. – М.: Машиностроение, 2008. – 496 с., ил.
46. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении., монография. - Киев: Техника, 1976, 296 с.
47. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении. // Трение и износ, 1985, т.6, №2, с.201 – 212.

48. Кравченко И.Н., Зорин В.А., Пучин Е.А., Бондарев Г.И. Основы надежности машин: Учебное пособие для вузов. – Ч. 1. – М.: Издательство, 2007. – 224 с.
49. Кравчук А.С., Кравчук А.И. Прикладные контактные задачи для обобщенной стержневой модели покрытия: монография. – СПб: Научно-технические технологии, 2019. – 221 с.
50. Крагельский И.В. Молекулярно-механическая теория трения. Сб. докладов второй Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. АН СССР, 1949, т.3.
51. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение. 1968. – 480 с.
52. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
53. Крылов К.А. Долговечность узлов трения самолетов. М., «Транспорт»,- 1976, -184 с.
54. Кубарев А.И., Панфилов Е.А., Хохлов Б.И. Надежность машин, оборудования и приборов бытового назначения. Учеб. для вузов. – М.: Легпромбытиздат, 1987. – 336 с.
55. Кузнецов С.А. Технология ремонта автотранспортных средств. Учебное пособие для студентов специальности 151001 "Технология машиностроения" / С.А. Кузнецов, О.А. Останин; – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 186 с.
56. Марков В. А. Повышение долговечности подвижных сопряжений ходовой части лесных машин при ремонте с применением композиционных материалов. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет.
57. Марков В.А., Марков А.Н., Кретинин В.И. Соколова В.А. Гайдукова П.А. Оптимизация выбора технологических процессов восстановления деталей. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии №217.
58. Масино М.А. Организация восстановления автомобильных деталей. – М.: Транспорт, 1981. – 176 с.

59. Матвеевский Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоёв и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. М., Машиностроение,- 1971, -228 с.
60. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. М., «Наука»,- 1977, -223 с.
61. Михин Н.М. Выбор нагрузки при моделировании внешнего трения. – В сб.: Моделирование трения и износа / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: НИИМАШ, 1970. – с.19.
62. Михин Н.М., Литвинов В.М., Крагельский И.В. Влияние нормальных напряжений на реализацию избирательного переноса при трении. – АН СССР, 1978, т.241, №4, с.781 – 784.
63. Мишин И.А. Долговечность двигателей. Л., Машиностроение,- 1976, - 228 с.
64. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 367 с.: ил.
65. Назаркин В.Г. Методы повышения долговечности триботехнических сопряжений / В.Г. Назаркин, Д.В. Романов//Докл. 68-й науч. конф. профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета СПбГАСУ. Ч.IV. – СПб.: СПбГАСУ, 2011. – с.161 – 163.
66. Назаркин В.Г. Эффект Ребиндера в полимерах/ В.Г. Назаркин, Д.В. Романов// Межрегиональной научно-практической конференции «Весна науки 2013», Общество «Знание» (г. Санкт-Петербург 2013).
67. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. / Под ред. П.Н. Угаева. – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с.
68. Официальный сайт компании Арко-турс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arkotours.ru/>, свободный – (03.11.2019)
69. Патент РФ на полезную модель № 185825. Устройство для измерения износа образцов на машине трения. Авторы. Шлапоберский А.А., Назаркин В.Г. 2018г.

70. Пичугин В.Ф. Избирательный перенос в узлах трения. – М., 2005. – 121 с.
71. Пичугин В.Ф., Колесников И.М. Влияние природы металла в смазочном материале на самоорганизующиеся процессы при трении. – Трение и износ, 1987, т.8, №4, с. 756 – 758.
72. Поляков А.А. Диссипативная структура избирательного переноса. – В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1986, вып. 2, с.97 – 106.
73. Поляков А.А. Основные явления избирательного переноса в узлах трения машин. – В кн.: Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения. – М.: Машиностроение, 1982, с.30 – 88.
74. Поляков А.А., Курлов О.Н. Влияние напряженного состояния поверхности трения на возбуждение и режим установившегося трения при избирательном переносе // Сб.: Исследование смазочных материалов при трении. Изд-во Наука, 1981. – 214 с.
75. Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований: метод. указания / сост. А.Н. Гайдадин, С.А. Ефремова; ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – 16с.
76. Прокопенко А.К. Методы повышения износостойкости элементов технологического оборудования на основе избирательного переноса. – В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1986, вып.2., с.126 – 131.
77. Пружанский Л.Ю. Исследование методов испытаний на изнашивание. М., «Наука»,- 1978, -116 с.
78. Радин Ю.А., Суслов П.Г. Безызносность деталей машин при трении. – Л.: Машиностроение, 1989. – 229 с.
79. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. – М.: Наука, 1978. – 25 с.
80. Ржепецкий К.Л. Судовые двигатели внутреннего сгорания: Учебник.- М., Судостроение,- 1984, -168 с.

81. Романов Д.В. Определение условий моделирования триботехнических процессов сопряжения типа "вал – втулка" на машине трения СМТ-1–
Современные проблемы науки и образования № 2,2013 .

82. Романов Д.В. Теоретические исследования долговечности подвижных сопряжений деталей агрегатов автомобилей. – Вестник гражданских инженеров, №3, с. 139 – 142.

83. Романов Д.В. Повышение эксплуатационной надежности триботехнических сопряжений двигателей автомобилей на этапе приработки. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Санкт-петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

84. Рыбаков Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.

85. Современная трибология. Итоги и перспективы. Отв. ред. К.В.Фролов. – М.: Издательство ЛКИ 2008. - 480 с.

86. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784 с.: ил.

87. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. – М.: Недра, 2000. – 317с.

88. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хедбы, А.В. Чичинадзе. т.1: Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

89. Стуканов В.А. Автомобильные эксплуатационные материалы: Учебное пособие. Лабораторный практикум. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2002. – 208 с.: ил.

90. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и дополн. / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. – М.: Наука, 2004. 535с.

91. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн.2 / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с., ил.

92. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/ И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. 268 с.

93. Усачев В.В. Исследование влияния функциональных добавок к смазочным композициям на работоспособность трибосопряжений. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Санкт-петербургский государственный университет водных коммуникаций.

94. Хазов Б.Ф., Дибусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

95. Ханин М.В. Механическое изнашивание материалов.- М.: Издательство стандартов,- 1984, -152 с.

96. Хасанов Р.Х. Основы технической эксплуатации автомобилей: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 193 с.

97. Хрущев М.М. Трение и изнашивание при высоких температурах. М., «Наука» ,- 1973, -156 с.

98. Хрущов М.М. Повышение износостойкости деталей двигателя внутреннего сгорания. М., Машиностроение,- 1972, -176 с.

99. Хрущов М.М. Принципы лабораторных испытаний материалов для подшипников скольжения/М.М. Хрущов//Методы испытаний и оценка служебных свойств материалов для подшипников скольжения. – М.: Наука, 1972. – 227 с.

100. Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г., Чигрина В.П., Барчан Г.П. Влияние ионов контактирующих металлов на процесс избирательного переноса. – Трение и износ, 1983, т.4, №4, с.615 – 620.

101. Чихос Х. Системный анализ в трибонике.М.,«Мир» ,- 1982, -343 с.

102. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Михин Н.М. К вопросу выбора нагрузки при моделировании трения. – В сб.: Трение твердых тел. – М.: Наука, 1961, с.45.

103. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента.- Л.: Машиностроение,- 1990, -208 с.

104. Nunez E E, Yeo S M, Polychronopoulou K, Polycarpou A. A. Tribological study of high bearing blended polymer-based coatings for air-conditioning and refrigeration compressors. Surf Coat Tech 205: 2994–3005 (2011).

105. Demas N G, Polycarpou A A. Tribological performance of PTFE-based coatings for air-conditioning compressors. *Surf Coat Tech* 203: 307–316 (2008).
106. ISO 4378-3:2009. Подшипники скольжения. Термины, определения, классификация и символы. Часть 3. Смазывание. – Взамен ISO 4378-3:1983; введен 01.09.2009. – 40 с.
107. McCarthy D M C, Glavatskih S B. Assesment of polymer composites fo hydrodynamic journal-bearing applications. *Lubr Sci* 21: 331–341 (2009).
108. *Tribology of Interface Layers* / Hooshang Heshmat. Taylor & Francis, 2010. – p. 444.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1

Результаты микрометража шкворня и втулки ходовой части автомобиля
Scania R серии, поступивших в капитальный ремонт

№ пп	Втулка $\varnothing 45_{-0,017}^{-0,024}$	Шкворень $\varnothing 45 - 0,007$		
		I	II	III
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1.	45,06	44,98	44,98	44,98
2.	45,07	44,98	44,99	44,98
3.	45,07	44,99	44,98	44,98
4.	45,05	44,98	44,98	44,98
5.	45,07	44,97	44,97	44,97
6.	45,05	44,97	44,98	44,98
7.	45,15	44,98	44,98	44,98
8.	45,05	44,98	44,98	44,98
9.	45,05	44,97	44,97	44,97
10.	45,06	44,98	44,98	44,97
11.	45,05	44,98	44,98	44,98
12.	45,06	44,98	44,98	44,98
13.	45,05	44,99	44,98	44,98
14.	45,07	44,98	44,98	44,98
15.	45,06	44,99	44,99	44,99
16.	45,05	44,90	44,90	44,90
17.	45,05	44,98	44,99	44,99
18.	45,04	44,99	44,99	44,99
19.	45,10	44,98	44,98	44,98
20.	45,05	44,98	44,98	44,99
21.	45,04	44,99	44,99	44,99
22.	45,06	44,97	44,98	44,97

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
23.	45,05	44,99	44,99	44,99
24.	45,06	44,99	44,99	44,99
25.	45,04	44,99	44,99	44,99
26.	45,03	44,97	44,97	44,97
27.	45,07	44,90	44,98	44,98
28.	45,04	44,98	44,98	44,98
29.	45,06	44,98	44,98	44,98
30.	45,06	44,99	44,99	44,99
31.	45,04	44,99	44,99	44,99
32.	45,03	44,99	44,99	44,98
33.	45,05	44,99	44,99	44,99
34.	45,05	44,98	44,98	44,98
35.	45,05	44,98	44,97	44,98
36.	45,03	44,98	44,98	44,98
37.	45,06	44,99	44,99	44,99
38.	45,07	44,99	44,99	44,99
39.	45,05	44,99	44,99	44,99
40.	45,09	44,98	44,98	44,98
41.	45,04	44,99	44,99	44,99
42.	45,05	44,99	44,99	44,99
43.	45,06	44,99	44,99	44,99
44.	45,03	44,98	44,98	44,98
45.	45,06	44,98	44,98	44,98
46.	45,05	44,99	44,99	44,99
47.	45,05	44,99	44,99	44,99
48.	45,09	44,99	44,99	44,99
49.	45,07	44,99	44,99	44,99
50.	45,08	44,99	44,99	44,99
51.	45,05	44,99	44,98	44,99
52.	45,05	44,99	44,99	44,99

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
53.	45,05	44,98	44,98	44,98
54.	45,05	44,99	44,98	44,99
55.	45,06	44,99	44,99	44,99
56.	45,08	44,99	44,99	44,99
57.	45,04	44,99	44,99	44,99
58.	45,06	44,99	44,99	44,99
59.	45,08	44,98	44,98	44,98
60.	45,08	44,99	44,99	44,99
61.	45,08	44,98	44,99	44,98
62.	45,04	44,98	44,98	44,98
63.	45,06	44,99	44,99	44,99
64.	45,09	44,99	44,99	44,99
65.	45,07	44,99	44,99	44,99
66.	45,07	44,98	44,98	44,98
67.	45,06	44,99	44,99	44,99
68.	45,09	44,99	44,99	44,98
69.	45,05	44,99	44,99	44,99
70.	45,04	44,98	44,98	44,98
71.	45,05	44,98	44,98	44,97
72.	45,08	44,98	44,97	44,98
73.	45,05	44,99	44,99	44,99
74.	45,06	44,99	44,99	44,99
75.	45,09	44,99	44,99	44,99
76.	45,05	44,98	44,98	44,98
77.	45,08	44,99	44,99	44,99
78.	45,06	44,99	44,99	44,98
79.	45,03	44,98	44,98	44,98
80.	45,07	44,99	44,99	44,99
81.	45,05	44,99	44,99	44,99
82.	45,07	44,98	44,98	44,99

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
83.	45,06	44,99	44,99	44,99
84.	45,05	44,99	44,99	44,99
85.	45,07	44,99	44,99	44,99
86.	45,07	44,99	44,99	44,99
87.	45,07	44,99	44,99	44,99
88.	45,10	44,98	44,98	44,98
89.	45,05	44,99	44,99	44,99
90.	45,06	44,99	44,99	44,98
91.	45,06	44,99	44,99	44,99
92.	45,06	44,98	44,98	44,98
93.	45,06	44,99	44,99	44,99
94.	45,05	44,99	44,99	44,99
95.	45,06	44,99	44,98	44,99
96.	45,05	44,99	44,99	44,99

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

«Утверждаю»
Декан факультета сервиса
Смольного университета
Профессор  В.А.Хлюпин
« 29 »  2019 г.

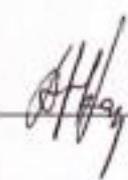
АКТ

реализации в учебном процессе кафедры Сервиса
результатов диссертации Шлапоберского А.А.

на тему: «Методика повышения долговечности узлов трения ходовой части
автотранспортных средств на основе композиционных материалов»

Результаты диссертационного исследования аспиранта Шлапоберского А.А., в частности методика восстановления шкворневых узлов трения рулевого управления транспортных средств с применением композиционных материалов, используется в учебном процессе кафедры Сервиса при подготовке студентов по дисциплинам «Техническое обслуживание и ремонт автомобилей», «Технологические процессы в сервисе».

Зав. кафедрой Сервиса
кандидат технических наук, доцент

 / А.Н.Крайнов /



ARCO-TOURS Ltd.

АКТ

о реализации результатов диссертационной работы Шлапоберского Анатолия Андреевича

На основе разработанной методики аспирантом кафедры ТЭТС СПбГАСУ Шлапоберским А.А. были выполнены экспериментальные исследования по теме диссертации: «Методика повышения долговечности узлов трения ходовой части автотранспортных средств на основе композиционных материалов». Исследования проводились с учётом особенностей парка автотранспорта ООО «Арко-Турс» на различных марках автопоездов.

В результате работы был внедрен потенциально новый материал-полиэфиркетон, ранее не применявшийся в шкворневых узлах трения ходовой части автопоездов.

Полезный эффект от применения при изготовлении шкворневых узлов полиэфиркетона оценивается на основе исследования физико-механических свойств установленного композиционного материала, вследствие которых было установлено, что предлагаемый материал, по сравнению с заводским материалом, имеют значительно больший ресурс работы и как следствие требует меньшего вложения денежных средств.

Экономический эффект, исходя из апробации использования метода восстановления шкворневых узлов трения рулевого управления автопоездов, заключается в уменьшении эксплуатационных расходов компании на 2242900 руб. в год при среднегодовом пробеге машины в 110000 км из расчета 110 единиц автопоездов среднегодового списочного состава.

Исполнительный директор
ООО «Арко-Турс»
Р. Б. Евсеенко



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ)

2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005
 Тел: (812) 400-06-67 Факс: (812) 316-58-72; rector@spbgasu.ru, www.spbgasu.ru
 ОКПО 02068580, ОГРН 1027810225310, ИНН - КПП 7809011023-783901001

№ _____
 На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе
 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
 государственный архитектурно-
 строительный университет»

Головина С.Г.

« 23 » 06 2020 г.

АКТ

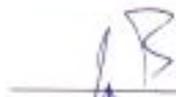
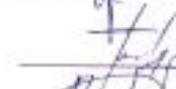
о внедрении результатов диссертационной работы
 Шлапоберского Анатолия Анатольевича
**«МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ
 ХОДОВОЙ ЧАСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
 НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**
 в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся,
 заведующий кафедрой технической эксплуатации транспортных средств,
 к.т.н., доцент Черняев И.О., к.т.н., доцент Торосян Л.Е. и к.т.н. Воробьев С.А.
 составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы
 соискателя Шлапоберского А.А. внедрены в учебный процесс кафедры
 технической эксплуатации транспортных средств и используются при
 разработке курсов лекций по дисциплинам «Технологии восстановления
 агрегатов и деталей» и «Основы работоспособности технических систем и
 диагностика» по направлению подготовки бакалавриата 23.03.03 –
 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов.

Заведующий кафедрой ТЭТС

К.т.н., доцент

К.т.н.

 /Черняев И.О./
 /Торосян Л.Е./
 /Воробьев С.А./

АКТ

реализации в учебном процессе кафедры «Технического обеспечения» ВАМТО
результатов диссертации Шлапоберского А.А.
на тему: «Методика повышения долговечности узлов трения ходовой части авто-
транспортных средств на основе композиционных материалов»

Результаты диссертационного исследования аспиранта Шлапоберского А.А.,
в частности методика восстановления шкворневых узлов трения рулевого управ-
ления автотранспортных средств используются в учебном процессе кафедры
«Технического обеспечения» при подготовке слушателей по дисциплине «Приме-
нение ремонтно-восстановительных частей и подразделений» по теме «Организа-
ция и планирование производства в ремонтно-восстановительных частях».

Начальник кафедры
кандидат технических наук,
профессор



/С.Г.Дубинин/

«Утверждаю»
 Проректор по учебной работе
 Университета при МПА ЕВРАЗЭС
 кандидат философских наук, доцент
 Е.Е. Ланина
 «20» _____ 2020 г.

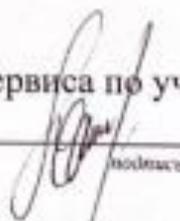


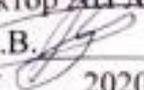
АКТ

реализации в учебном процессе кафедры Сервиса транспортных средств
 результатов диссертации Шлапоберского А.А.
 на тему: «Методика повышения долговечности узлов трения ходовой части
 автотранспортных средств на основе композиционных материалов»

Результаты диссертационного исследования аспиранта Шлапоберского А.А., в частности методика восстановления шкворневых узлов трения рулевого управления транспортных средств с применением композиционных материалов, используется в учебном процессе кафедры Сервиса транспортных средств при подготовке студентов по дисциплинам «Техническое обслуживание и ремонт автомобилей», «Технологические процессы в сервисе».

Зам. декана факультета автомобильного сервиса по учебной и научной работе
 кандидат технических наук, доцент _____ / Ю.В. Михалев /



Утверждаю
Директор АТП №6
Богданов М.В. 
« 28 » 05 2020г.

АКТ

о реализации результатов диссертационной работы
Шлапоберского Анатолия Андреевича

По результатам диссертационного исследования аспиранта Шлапоберского А.А. на тему: «Методика повышения долговечности узлов трения ходовой части автотранспортных средств на основе композиционных материалов» в автобусном парке №6 ГУП «Пассажиравтотранс» были проведены подконтрольные испытания с учётом особенностей подвижного состава предприятия с целью определения эффективности внедрения материала полиэфиркетона в узлы трения рулевого управления автомобилей.

По окончании испытаний было проведено контрольное вскрытие двух шкворневых узлов трения для выявления степени их изношенности. Случаев образования задиров и прочих явлений пластической деформации не обнаружено. Подконтрольные узлы полностью соответствуют условиям эксплуатации при достижении пост гарантийного пробега в 160 тыс. км.

Главный инженер



Букин А.А.