

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Назаркин Виктор Гаврилович

Официальные оппоненты: **Картошкин Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, кафедра «Автомобили, тракторы и технический сервис», профессор;
Кокорев Геннадий Дмитриевич
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева, кафедра «Технической эксплуатации транспорта», профессор;

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
Государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова».

Защита диссертации состоится «15» декабря 2020 г. в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, аудитория 219.

Тел/факс: 8 (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/shlapoberskiy-anatoliy-andreevich>

Автореферат разослан «02» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

 Олещенко Елена Михайловна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 его 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 изготовления их под ремонтный размер из полиэфиркетона.

Корректность и обоснованность методики расчетов триботехнических сопряжений ходовой части оказывают значительное влияние на их безотказность 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, восстановленных 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 восстановленного 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 ШП-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, восстановленных 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 диссертационной работы опубликованы в 9 печатных работах, в числе которых 2 статьи в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 1 патент на полезную модель, 6 статей в сборниках тезисов и докладов научных конференций и других изданиях.

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.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

Анализ состояния вопроса восстановления узлов трения и выбор направления исследований

Дана классификация способов восстановления. Проведен анализ направлений повышения долговечности узлов трения ходовой части автопоездов. Выявлено, что применение современных композиционных материалов является наиболее перспективным направлением повышения их эффективности использования при ремонтном производстве.

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 необходимость увеличения долговечности этих узлов. Восстановление данного узла методом ремонтной детали значительно уменьшит количество отказов рулевого управления автопоездов.

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

Теоретическое обоснование и разработка математической модели трения подвижных сопряжений узлов ходовой части автотранспортных средств

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 (рис. 1). 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.

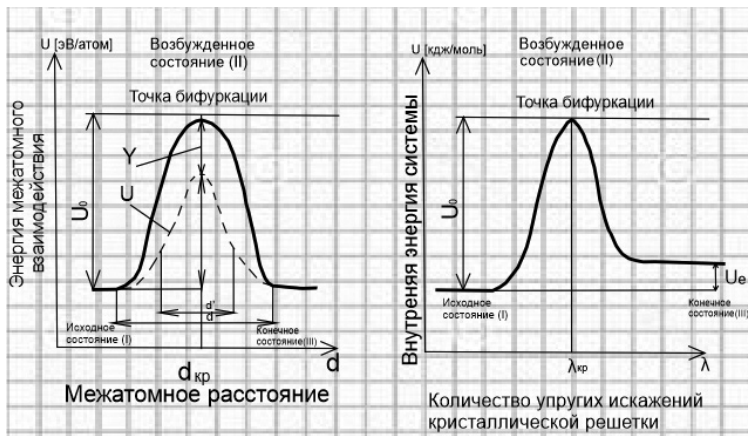


Рис. 1 – Энергетическая диаграмма кинетических переходов из устойчивого состояния в неустойчивое (I) – устойчивость, (II) – устойчивость, (III) – устойчивость: d – среднее межатомное состояние; d – межатомное расстояние под действием внешней нагрузки; λ – параметр повреждаемости; U_0 – энергия активации процесса; $U_{(e)}$ – эффективная энергия активации; $U_{(e)}$ – запасенная энергия решетки; $\gamma\sigma$ – механическая работа по растяжению межатомной связи

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.

Для планирования математического эксперимента необходимо определить, как будет температура и сила трения в зависимости от времени влиять на материал. При проведении эксперимента были составлены графики зависимостей, изображенных на рис. 2 для заводской бронзовой втулки (БР ОЦС 5-7-12) и полиэфиркетона по остальной поверхности.

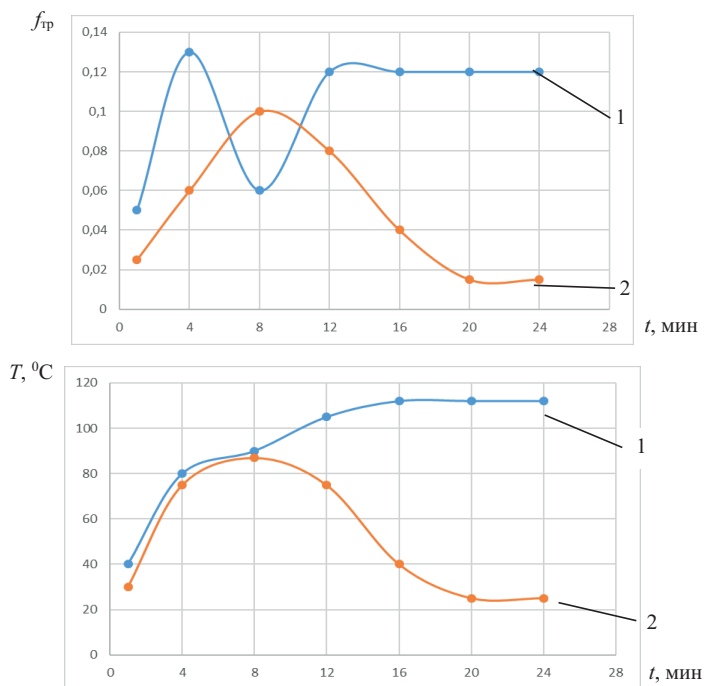


Рис. 2 – Изменение триботехнических характеристик при трении 1 – Бр ОЦС 5-7-12 (1) и 2 – полиэфиркетона по стальной поверхности

При работе бронзовой втулки по остальной 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 рис. 2 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.

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 $F_{тр}$ покоя и F , пропорциональной совокупности двух давлений. Совокупность сил Штрибека и кулоновской силы можно объединить в силу страгивания, которая выражена формулой (1).

$$F_{тр} = \begin{cases} \{F_c \cdot (1 + (K_{brk} - 1) \cdot e^{-C_v |v_{нпр}|}) \cdot \text{sgn}(v_{нпр}) + f_{vf} \cdot v_{нпр}, \text{при } |v_{нпр}| \geq v_0 \\ K \cdot v_{нпр}, \text{при } |v_{нпр}| < v_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где: F_c – кулоновское трение; K_{brk} – коэффициент изменения силы страгивания; C_v – коэффициент, характеризующий интенсивность спада силы страгивания; f_{vf} – коэффициент вязкого трения.

Кулоновское трение определяется по следующей зависимости:

$$F_c = F_{pr} + f_{cf} \cdot (p_a + p_b). \quad (2)$$

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

$$f_c = A_r \cdot p^{-2/3} \cdot v^{-0.4} \cdot \mu^{-1/6} + A_{ж} \cdot p^{-0.5} \cdot v^{-0.5} \cdot \mu^{-0/5}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости жидкости.

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.

$$\frac{dF_{\text{тр}}^{\text{нс}}}{dt} = \frac{1}{T_{\text{упл}}} \cdot (F_{\text{тр}} - F_{\text{тр}}^{\text{нс}}), \quad (4)$$

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.

Выполнен полнофакторный эксперимент второго порядка, чтобы оценить как влияет каждый фактор (T – время выдержки, P – давление на шкворень; t °C – температура в узле) и все вместе на скорость износа триботехнического сопряжения.

В табл. 1 приведены результаты математического эксперимента.

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.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний

№	P , МПа	T , час	t , °C	l_1 , мкм/час	l_2 , мкм/час	l_3 , мкм/час	$l_{\text{сред}}$ 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

№	P , МПа	T , час	t , °С	l_1 , мкм/час	l_2 , мкм/час	l_3 , мкм/час	$l_{\text{сред}}$, мкм/час
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

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.

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

Технология изготовления втулки из полиэфиркетона включает механическую и слесарную обработку на токарном станке.

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 Баихина В.В.

Данные, которые отражены в табл. 2, дают возможность задавать более продуктивные методы обработки покрытия, а также при помощи коэффициента долговечности осуществлять оптимальный маршрут восстановления деталей.

Таблица 2

Оценочные показатели способов нанесения покрытия

Показатель	Π_1 , г/ч	Π_2 , г/ч	N_n , кВт	$N_{\text{тех}}$, кВт	K_2 , г/кВт·ч	K_1 , г/кВт·ч
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

Показатель	Π_1 г/ч	Π_2 г/ч	N_n кВт	$N_{Тех}$ кВт	K_2 г/кВт·ч	K_1 г/кВт·ч
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

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.

Исследование микроструктуры материала выполняется для оценки влияния термодформационного 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 рис. 3 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).

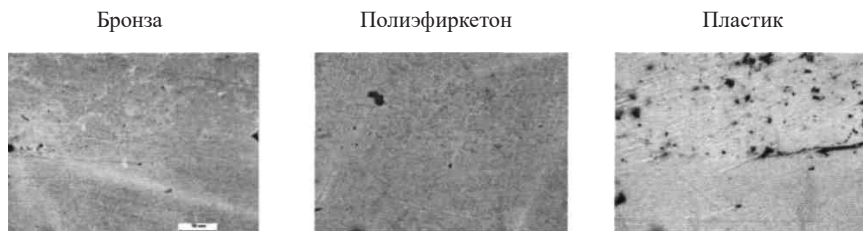


Рис. 3 – Структура материалов после пройденного гарантийного ресурса в 40 тыс. км

На рис. 4 представлены графики исследования по твёрдости трех рассматриваемых образцов из заводского пластика ПЭВД 17703-010, бронзы (БрОЦС5-7-12) и полиэфиркетона (Ketron PEEK 1000).

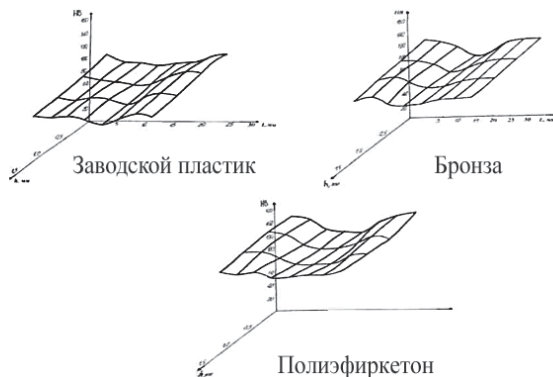


Рис. 4 – Исследование твердости композиционных покрытий

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

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 (HV-130), по сравнению с другими материалами.

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.

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. Измерения проводились с помощью профилографа ЩП-17. На основе эксперимента можно сделать вывод, что применение вибронакатки полезно для деталей из любого материала. 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.

Таблица 3

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 %



Рис. 5 – Процесс вибронакатки на внутреннем диаметре детали

На рисунке 6 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.

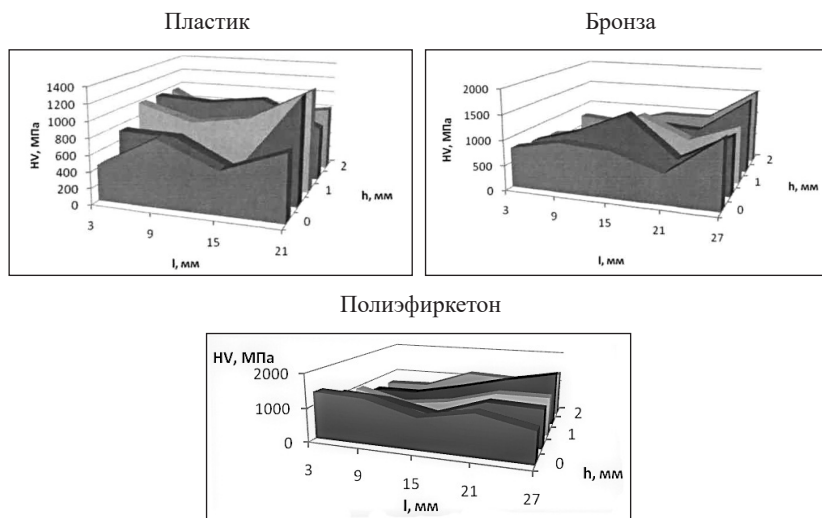


Рис. 6 – Микротвердость покрытия

При проведении измерения на пористость размер образца должен быть не меньше $0,5 \text{ см}^3$. При этом 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. Полученные данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

Полученные данные исследования на пористость покрытий

№	Материал	$\rho_{к^*}$ г/см ³	h , мм	$m_{возд^*}$ г	$m_{воды^*}$ 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

№	Материал	$\rho_{к^*}$, г/см ³	h , мм	$m_{возд}^*$, г	$m_{воды}^*$, г	ρ , г/см ³	П, % (пористость)
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 PEEK 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.

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

В соответствии с полученными результатами в программе Grapher, был построен график, на рис. 7, зависимости процента поглощения коррозией материалов в зависимости от дней. 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.

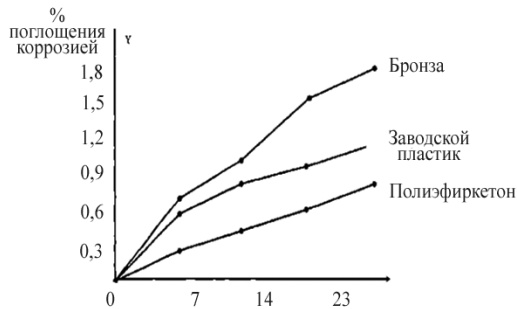


Рис. 7 – График поглощения материала коррозией

Также были вычислены зависимости методом аппроксимации :

$$Y(\text{бронзы}) = 0,165 + 0,062x \text{ (при } K_{\text{кор}} = 0,976), \% \quad (5)$$

$$Y(\text{заводского пластика}) = 0,191 + 0,037x \text{ (при } K_{\text{кор}} = 0,948), \% \quad (6)$$

$$Y (\text{полиэфиркетона}) = 0,027 + 0,027x (\text{при } K_{\text{кор}} = 0,994), \% \quad (7)$$

где x – дни; $K_{\text{кор}}$ – коэффициент корреляции.

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.

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.

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

Для наглядного понимания работы комплекса, изображена его схема на рис. 8. Основные характеристики, а именно момент трения $M_{\text{тр}}$ и температура трения T , данная машина трения определяет за счет приборов, установленных в шкаф ее управления.

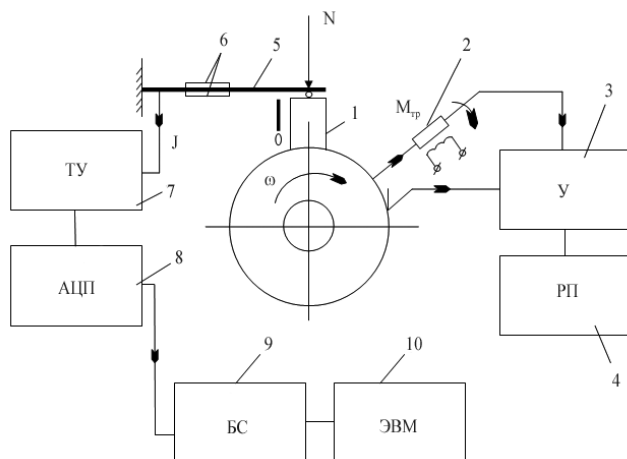


Рис. 8 – Схема комплекса для проведения триботехнических испытаний:

- 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

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.

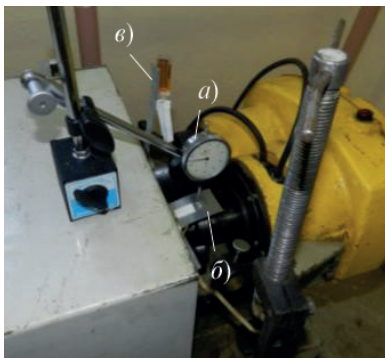


Рис. 9 – Узел трения:
а) – индикатор; б) – тензодатчик;
в) – установка подачи масла

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

Давление на узел, скорость скольжения, 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:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot N + b_2 \cdot C, \text{ мкм/мин,} \quad (8)$$

где N – значение нагрузки при контакте, Н; C – скорость при контакте, км/мин .

В табл. 5 указаны необходимые значения уровней меняющихся факторов. Был проведен полнофакторный эксперимент второго порядка для определения величин коэффициентов уравнения.

В табл. 6 представлена матрица планирования и экспериментальные данные.

Таблица 5

Показание значений варьируемых факторов

Значения варьируемых факторов	Обозначение	Нагрузка, Н	
		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 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:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij}, \quad (9)$$

где \bar{Y}_i – среднее арифметическое 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:

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2. \quad (10)$$

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

$$G_p = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (11)$$

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

При помощи критерия Стьюдента осуществляется контроль значимости коэффициентов. При этом он рассчитывается по формуле :

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (12)$$

где S_{b_i} – значение ошибки коэффициента регрессии; b_i – численное значение коэффициента регрессии.

При выполнении условия (13), коэффициент уравнения регрессии можно считать действительным:

$$t_{ip} > t_{\text{табл}}, \quad (13)$$

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

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

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{V^2}, \quad (14)$$

где $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности расчетов выражается в следующем виде:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - l}, \quad (15)$$

где $y_i - \hat{y}_i$ – показатели значения целевой функции (расчетное и экспериментальное); l – число необходимых коэффициентов и уравнений.

Выдерживая условие (16), уравнение регрессии составлено верно.

$$F_p < F_{\text{табл}}. \quad (16)$$

В табл. 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.

Оптимальным диапазоном является по нагрузке,

$$46 \leq N \leq 56 \text{ кН}. \quad (17)$$

По скорости,

$$0,91 \leq C \leq 1,05 \text{ м/мин}. \quad (18)$$

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 с применением композиционного материала – полиэфиркетона.

**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 движение, 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	$0,2264 \cdot 10^{-6}$ $0,1708 \cdot 10^{-6}$ $0,1152 \cdot 10^{-6}$ $0,1090 \cdot 10^{-6}$ $0,5964 \cdot 10^{-7}$ $0,960 \cdot 10^{-7}$ $0,4055 \cdot 10^{-8}$ $0,70 \cdot 10^{-7}$ $0,5153 \cdot 10^{-7}$ $0,117 \cdot 10^{-6}$

Технология восстановления деталей из композиционных материалов, применительно к узлам трения ходовой части транспортных средств

Восстановление рассматриваемого шкворневого узла началось с разработки карты технологического процесса шкворневого узла.

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

$$K_d = f(K_{сц}, K_n, K_b), \quad (19)$$

где K_n – коэффициент износостойкости; $K_{сц}$ – коэффициент сцепления; K_b – 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.

Проведение наблюдений позволило установить, что в реальных узлах (шкворневых узлах ходовой части автомобиля Volvo FH серии) отсутствуют факторы, отвечающие за выносливость сопрягаемых поверхностей.

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.

Критический износ сопряжения будет численно равен:

$$110000 \times K_d = 110000 \times 1,5 = 165000 \text{ тыс. км.} \quad (20)$$

Полученный ресурс данного сопряжения совпадает с ремонтным циклом автомобилей Scania R серии или Volvo FH серии. Для проведения анализа структуры покрытия втулки из полиэфиркетона производим изготовление образца в режиме, оптимальном с точки зрения долговечности покрытия. При помощи электронного микроскопа была исследована структура материалов в переходной зоне. Снимки были выполнены и 50-, 200-, и 500-кратном увеличении (рис. 10.).

Рассмотрев выполненные снимки, можно констатировать нечеткую переходную зону из-за диффузии в ней углерода и цинка. Из данных фотографий видно, что у бронзы и композита отсутствует четкая переходная зона. Поэтому прочность сцепления имеет высокие численные показатели.

На основе вышеизложенного, следует 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.

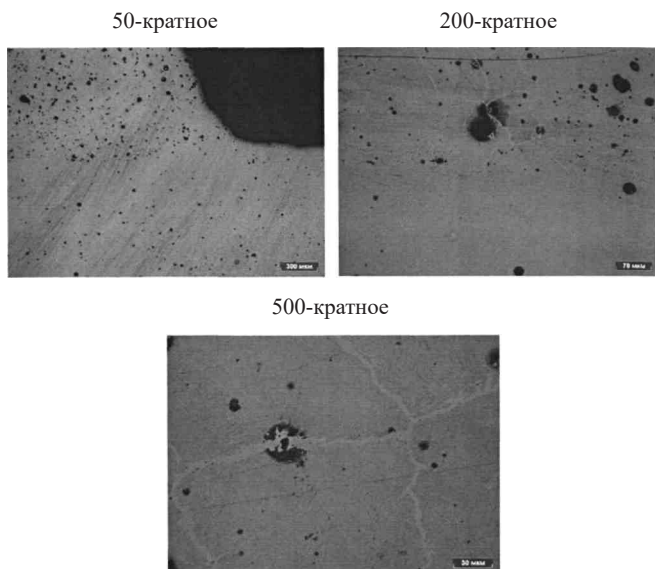


Рис.10 – Структура исследуемых материалов в переходной зоне

Для оценки скорости приработки шкворневого узла с помощью профилографа была выполнена профилограмма поверхностей трения (рис. 11). Зафиксированные параметры шероховатости поверхности втулок были занесены в табл. 8. Результаты профилографического исследования поверхностей трения втулок шкворневого узла показывают, что приработка триботехнических сопряжений произойдет на треть быстрее, чем по техническим условиям на капитальный ремонт.

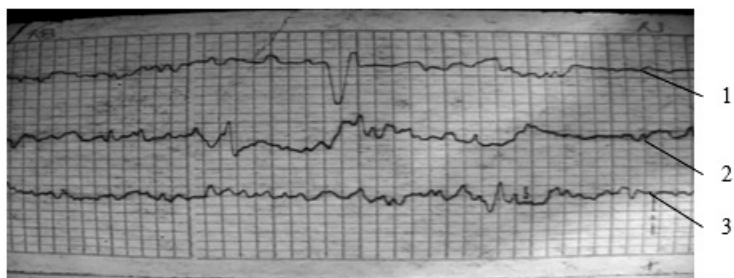


Рис. 11 – Профилограммы узлов трения: 1 – до приработки; 2 – после приработки по ТУ на КР; 3 – после приработки с использованием полиэфиркетона на рекомендуемых режимах

Таблица 8

Параметры шероховатостей поверхностей втулок шкворневого узла

Поверхность втулки	Параметры шероховатости					
	R_a	R_z	R_{max}	R_p	S_m	R_p / 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

Отремонтированные сопряжения были установлены на грузовые автомобили марок Scania R серии, Volvo FH серии, с общим количеством восстановленных сопряжений 2 (два), по два сопряжения на автопоезд на 16 июня 2016 года.

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.

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.

Таблица 9

Расчётные данные основных показателей до и после внедрения полиэфиркетонной втулки

Показатели	Единицы измерения	До внедрения	После внедрения
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

Показатели	Единицы измерения	До внедрения	После внедрения
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

В табл. 9 приведены расчётные данные основных показателей, из которых образуется экономический эффект до и после внедрения полиэфиркетонной втулки.

Исходя из полученных данных, указанных в табл. 9 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 предприятия в год.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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, восстановленных 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.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Публикации, в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. *Шлапоберский А.А.* Организация технического обслуживания и ремонта автомобилей на рабочих постах / Шлапоберский А.А., Назаркин В.Г. // Вестник гражданских инженеров. – СПб., СПбГАСУ. – 2019. – № 2, – С. 161–166.

2. *Шлапоберский А.А.* Научные задачи исследования триботехнических систем и практическое применение их результатов в эксплуатации и ремонте автотранспортной и дорожно-строительной техники / Шлапоберский А.А., Горшков В.Н. // Вестник гражданских инженеров. – СПб., СПбГАСУ. – 2016. – № 6, – С. 205–208.

Патент

3. *Шлапоберский А.А.* Патент РФ на полезную модель № 185825. Устройство для измерения износа образцов на машине трения. Авторы Шлапоберский А.А., Назаркин В.Г. 2018 г.

Публикации в других изданиях:

4. *Шлапоберский А.А.* Методика определения износа при экспериментальных исследованиях // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – Москва, МАДИ. – 2017. – № 4 (14).

5. *Шлапоберский А.А.* Инновационные пластики для машиностроительной промышленности // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – Москва, МАДИ. – 2017. – № 3 (13).

6. *Шлапоберский А.А.* Методика выбора рациональных способов восстановления деталей / Шлапоберский А.А., Давыдов Н.А., Назаркин В.Г. // Материалы 73-ей научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. – СПб., СПбГАСУ. – 2017. – С. 71–75 .

7. *Шлапоберский А.А.* Снижение отрицательного воздействия отработавших газов в дизельном двигателе на окружающую среду // Материалы городской научно-практической конференции «Интеграция инженерного и экологического мышления в детском техническом творчестве». – СПб., СПбГДЦТТ. – 2017. – С. 39–41.

8. *Шлапоберский А.А.* Инновационные композитные материалы, применяемые при производстве и ремонте автомобилей // Материалы 69-ой научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб., СПбГАСУ. – 2016. – С. 72–75.

9. *Шлапоберский А.А.* Применение современных композиционных материалов в автомобилестроении и авторемонте // Материалы 72-ой научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. – СПб., СПбГАСУ. – 2016. – С. 117–121.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 12.10.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 93.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4. Отпечатано на МФУ.

198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

