

Министерство образования Республики Беларусь
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК № 621.81/.89
№ госрегистрации 20170355
Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
Полоцкого государственного
университета
к.п.н., доцент _____ И.В. Бурая
«__» _____ 20__ г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
«Разработка технологий и получение многофункциональных
материалов для обеспечения исправного состояния парка
автомобилей в течение всего срока службы» (заключительный)

Начальник ОСНИ
_____ Гончарова Т.В.
«__» _____ 20__ г.

Научный руководитель НИР
канд. техн. наук, доцент
_____ Вигерина Т.В.
«__» _____ 20__ г.

Новополоцк 2021г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель задания,
к.т.н, доцент

_____ Вигерина Т.В.
(научное руководство, разделы 1,
2, 3, 4, заключение)

д.т.н, профессор

_____ Иванов В.П.
(введение, разделы 1, 2, 3, 4,
заключение)

к.т.н, доцент

_____ Лисовский А.Л.
(разделы 1, 3)

к.т.н, доцент

_____ Дудан А.В.
(разделы 2,4)

к.т.н, доцент

_____ Штемпель О.П.
(разделы 2, 4)

к.т.н, доцент

_____ Завистовский В.Э.
(разделы 1, 2)

к.т.н, доцент

_____ Веремей Г.А.
(разделы 3)

к.т.н, доцент

_____ Пилипенко С.В.
(разделы 3)

к.т.н, ст. преподаватель

_____ Селицкий А.Н.
(разделы 1, 2)

к.т.н, доцент

_____ Фруцкий В.А
(введение, разделы 1,2, 3, 4
заключение)

м.т.н, ст.преподаватель

_____ Семенченко М.В.
(раздел 2)

м.т.н, ст.преподаватель

_____ Кострицкий В.В.
(раздел 1)

ст. преподаватель

_____ Конон М.В.
(раздел 1)

Нормоконтроль

_____ Ищенко Л.В.

РЕФЕРАТ

Отчет 104 стр., 77 рис, 10 табл., 77 ист.

Объект исследования – ремонт автомобилей с восстановлением их деталей, процессы нанесения покрытий, смазочные материалы, автомобильные агрегаты, процессы, алгоритм и оборудование для их диагностирования,

Предмет исследования – зависимости между составом материала покрытий и режимами их нанесения, составом смазки, с одной стороны и эксплуатационными свойствами деталей, с другой стороны, поиска неисправностей, зависимость трудоемкости диагностирования двигателей от состава диагностических работ.

Цель работы – обоснование мероприятий, обеспечивающих экономически обоснованное пребывание парка автомобилей в исправном состоянии в течение всего эксплуатационного цикла.

Задачи:

усовершенствование существующих технологических процессов восстановления деталей:

получение опытных образцов деталей с использованием разработанных технологий;

– диагностирование агрегатов автомобилей для определения остаточного ресурса;

– исследование эксплуатационных свойств многофункциональных материалов и покрытий из них:

– имитационное моделирование обслуживающее-ремонтного цикла автомобилей.

В работе рассмотрены причины потери работоспособности деталей автомобиля и обосновано возвращение среднего ремонта агрегатов в систему технического обслуживания и ремонта автомобилей с обоснованием заменяемого при нем комплекта деталей и предложены меры по упрочнению деталей, позволяющие достичь нормативной наработки.

Проанализированы существующие технологические процессы восстановления деталей и предложен вариант восстановления шеек валов наплавкой с использованием в качестве наплавочного материала порошка ПГ-19М-01 и износостойкого хромистого чугуна.

Установлено, что интенсивность изнашивания материала покрытия, восстановленных распределительных валов сопоставима с интенсивностью изнашивания новых или ниже в 1,2 раза. Требуемая интенсивность изнашивания обеспечена микроструктурой материала покрытия после наплавки, представляющей гетерогенную структуру, состоящую из карбидной матрицы и эвтектики (наплавка ИЧХ) и перенасыщенный α – твёрдый раствор Al и Fe в Cu; β – упорядоченный твёрдый раствор на основе соединения Cu_3Al (наплавка ПГ-19М-01). На основании полученных экспериментальных исследований для восстановления стальных распределительных валов рекомендована газопорошковая наплавка кулачков порошком ПГ-19М-01 и дуговая наплавка шеек износостойким хромистым чугуном ИЧХ18,

позволяющим получить покрытие с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения.

Для упрочнения гильзы цилиндра разработан способ образования микрорельефа на внутренней поверхности, который включает образование выступов поверхности оплавлением лазерным излучением с последующим хонингованием выступов микрорельефа до необходимой высоты и определены, с точки зрения максимизации гидродинамической несущей способности, шаго-высотные параметры микрорельефа, которые могут обеспечить минимальный, но достаточный зазор в сопряжениях цилиндропоршневых групп для обеспечения жидкостного трения.

Для оценки износостойкости упрочненных поверхностей гильз цилиндров были проведены триботехнические испытания в три этапа на экспериментальных стендах в условиях, приближенных к реальным. В результате были получены как прямые, так и косвенные подтверждения эффективности микрорельефа на внутренней поверхности гильзы. При этом результаты представлены в виде графиков, которые в полной мере отражают преимущества износостойкости поверхностей с нанесенным на них микрорельефом над аналогичными поверхностями без микрорельефа.

Установлено, что использование смазки, модифицированной добавками наноразмерных алмазов, перспективно для узлов трения, содержащих элементы с высокой прочностью и твердостью. Варьируя типы смазки концентрацией модификатора в ней можно достигать более высокого уровня триботехнических свойств трибосопряжений, работающих в смазке с добавками наноразмерных алмазов.

Полученные закономерности зависимости интенсивности изнашивания от процентного содержания наноразмерных алмазов в различных смазочных материалах показал, что из всех рассмотренных образцов максимальное снижение коэффициента трения и минимальная интенсивность изнашивания наблюдалось у образцов, работающих со смазкой, содержащей 0,45 % наноалмазов. В период приработки на длине пути до 100 м коэффициент трения снизился на 3,3 %, а в период установленного изнашивания было зафиксировано снижение коэффициента трения на 7,3 % с учетом качественных скачков при прохождении контрольных точек.

Полученные результаты исследований показывают, что при использовании смазки с наноразмерным алмазным компонентом снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания наблюдается на более ранних стадиях приработки. Можно предположить, что это происходит за счет упрочнения поверхностных слоев стали, их модифицирования частицами ультрадисперсных алмазов в процессе фрикционного взаимодействия. Таким образом, можно рекомендовать применение базового масла с наноразмерными алмазами (~0,45 % НА) для повышения эффективности приработки двигателей внутреннего сгорания при их капитальном ремонте.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение.....	8
Раздел 1 ОБОСНОВАНИЕ МЕР ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ПОСЛЕРЕМОНТНОЙ НАДЕЖНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ	10
Состояние проблемы.....	10
Пути решения.....	13
-Обслуживающе-ремонтные мероприятия.....	13
-Технико-экономический критерий.....	14
-Средние ресурсы деталей двигателей.....	15
-Мероприятия по повышению послеремонтной наработки трущихся деталей.....	16
-Ремонтный цикл.....	16
Технология диагностирования двигателей с использованием современных информационных технологий.....	20
Выводы.....	31
Раздел 2 МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛОВ	33
Анализ неисправностей валов.....	34
Рекомендуемые способы восстановления.....	35
Сравнительные триботехнические характеристики.....	37
Выводы.....	46
Раздел 3 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ	48
Анализ сил, действующих в цилиндро-поршневой группе.....	48
Распределение температур в цилиндро-поршневой группе.....	63
Выводы.....	68
Раздел 4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИБОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	69
Анализ технологий наноразмерного трибомодифицирования.....	70
Выбор материалов для трибомодификации.....	73
Технологии безразборного ремонта двигателя.....	75
Методы трибомодифицирования.....	77
Триботехнические испытания.....	79
Влияние приработки/обкатки на износ трибопары.....	85

Анализ влияния контактного давления на износ трибосопряжения.....	87
Выводы.....	70
Заключение.....	71

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

CSS – Crank Shaft Sensor;
ВМТ – Верхняя мёртвая точка;
ДВС – Двигатель внутреннего сгорания;
ДПКВ – Датчик положения коленчатого вала;
КШМ - Кривошипно-шатунный механизм;
ТС – Транспортное средство;
УОЗ – Угол опережения зажигания;
ЦПГ – Цилиндропоршневая группа;
ЭБУ – Электронный блок управления;
ЦПГ – Цилиндропоршневая группа;
ВМТ – Верхняя мертвая точка;
НМТ – Нижняя мертвая точка;
ГНС – Гидродинамическая несущая способность;
ЛИ – Лазерное излучение;
ЗЛВ – Зона лазерного воздействия;
КВ – Коленчатый вал;
УДА – Ультрадисперсные алмазы;
НА – Наноалмазный компонент;
ПСМ – Пластичные смазочные материалы;
ДФ – Дисперсная фаза;

ВВЕДЕНИЕ

Надежность техники в значительной степени определяется интенсивностью изнашивания трущихся поверхностей деталей. Из-за их изнашивания ежегодно простаивает от 10 до 40 % машин и оборудования, что является причиной неоправданно больших затрат материальных и трудовых ресурсов на техническое обслуживание и ремонт техники. В значительной степени это обусловлено тем, что рабочие узлы машин и аппаратов подвергаются воздействию большого количества неблагоприятных эксплуатационных факторов, которые отрицательно влияют на долговечность трибосопряжений и сокращают, таким образом, ресурс машин. К ним относятся: запыленность воздуха, значительные колебания влажности окружающей среды, взаимодействие с почвой и растительной массой, воздействие температуры среды, высокие динамические нагрузки, попадание абразивных частиц в узлы трения. Это ведет к снижению ресурса техники, т.е. наработки изделия от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Автомобиль, например, состоит из различных узлов и агрегатов. Основным узлом автомобиля является двигатель. Ресурс двигателя внутреннего сгорания зависит в основном от состояния кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов, а распределительный вал – это главное звено газораспределительного механизма.

Восстановление изношенных деталей автомобилей обеспечивает экономию металла, топлива, энергетических и трудовых ресурсов, а также рациональное использование природных ресурсов и охрану окружающей среды. Для восстановления работоспособности изношенных деталей автомобилей требуется в 5–8 раз меньше технологических операций по сравнению с изготовлением новых деталей.

Прочностные свойства деталей автомобилей зависят от физико-механических характеристик материала, из которого они изготовлены. Но ресурс разных деталей при достаточной прочности основного материала обычно связан со свойствами материала поверхностного слоя детали из многофункциональных материалов, качеством поверхности и условиями эксплуатации. Для создания поверхностных слоев с требуемыми характеристиками (состав, структура, свойства) применяют различные способы обработки – механические, термические, электрофизические, электрохимические и их сочетания. В результате формируются поверхностные слои толщиной от нескольких микрометров до 1 мм с улучшенными характеристиками, обеспечивающими уменьшение износа и повышение эксплуатационной надежности.

Раздел 1. ОБОСНОВАНИЕ МЕР ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ПОСЛЕРЕМОНТНОЙ НАДЕЖНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ

Состояние проблемы. Главная задача авторемонтного производства заключается в восстановлении надежности автомобилей при полном использовании остаточной долговечности деталей. Долговечность автомобилей в последнее время существенно повысилась за счет применения новых материалов и более совершенного оборудования. При этом за место на рынке продукции и услуг столкнулись финансовые интересы структур двух групп. Первая группа включает производство автомобилей и запасных частей, посредничество и обслуживающий бизнес. Вторая группа – это сохранившаяся часть производства по специализированному ремонту и владельцы техники. В результате этого произошел развал ремонтного производства с исключением капитального ремонта полнокомплектных автомобилей из их жизненного цикла и сокращением объемов ремонта агрегатов на специализированных предприятиях.

Вопросы трения, изнашивания в машинах и повышения износостойкости деталей рассмотрены в работах И.В. Крагельского, Д.Н. Гаркунова, П.Н. Богдановича, В.Я. Прушака и др. Согласно данным, приведенным в работах [2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 45, 46, 48], основное влияние на работоспособность деталей машин, работающих в условиях трения скольжения, оказывает изнашивание. Ему также сопутствуют явления, ускоряющие разрушение поверхностей деталей машин. Большой вклад в изучение проблем трения и изнашивания трибосопряжений и разработку способов трибомодифицирования поверхностей трения машин и механизмов внесли работы В.Ф. Лоренца, Ф.П. Боудена, Д.Тайбора, В.А. Белого, П.А. Витязя, Д.Н. Гаркунова, Ю.Н. Дроздова, Е.А. Духовского, В.И. Жорника, И.В. Крагельского, В.И. Колесникова, П.А. Ребиндера, А.А. Силина, Г.М. Сорокина, А.В. Чичинадзе и др. [12, 21, 27, 32, 41, 42, 48].

Анализ явлений, происходящих при сближении и скольжении трущихся поверхностей, показал, что возникают механическое и молекулярное взаимодействия, которые вызывают механические, химические и структурные изменения поверхностей трения, а затем разрушение поверхностных слоев материала.

Изнашивание поверхности трения происходит вследствие разрушения фрикционных связей из-за упругого и пластического отсечений материала, микрорезания, адгезионного разрушения пленок и когезионного разрушения

материала. Первые три вида нарушения фрикционных связей наблюдаются при механическом взаимодействии, последние два – при молекулярном [4, 179].

Механические взаимодействия сопровождаются молекулярным взаимодействием. Вид разрушения зависит от прочности пленки, разделяющей контактируемые поверхности. Если прочность пленки меньше прочности основного материала, то происходит ее адгезионный отрыв, если же прочность пленки или поверхностных слоев больше прочности основного материала и прочность их связи с основным материалом велика, то происходит когезионный отрыв (глубинное вырывание).

Для обеспечения внешнего трения необходимо, чтобы неровности, имеющиеся на поверхности более твердого тела, обтекались более мягким материалом, по которому они скользят. При скольжении выступа неровности по пластически деформируемой поверхности впереди будет образовываться валик, а сзади – канавка. Сопротивление обусловлено объемным деформированием тонкого поверхностного слоя и преодолением адгезионных связей, возникающих между пленками, покрывающими твердые тела. Наиболее выгодным в этой связи является сочетание тонкой пленки самосмазывающегося материала с металлом. При этом прочность на срез определяется малой прочностью смазывающегося материала, а сопротивление внедрению – высокой прочностью металла, который покрыт тонкой пленкой материала [27].

Низкое сопротивление сдвигу на границе раздела трущихся тел обеспечивают учетом правила положительного градиента механических свойств материала по глубине его поверхностного слоя [4]

$$d\tau/dz > 0, \text{ Н}\cdot\text{м}^{-3}, \quad (1.1)$$

где τ – разрушающее напряжение сдвига, Па;

z – значение координаты, направленной вглубь материала перпендикулярно поверхности трения, м.

Коэффициент трения поверхностей должен иметь минимальное значение. Для упругого контакта при малых нагрузках и отсутствии смазки коэффициент трения в основном зависит от контактного давления, прочности адгезионной связи, модуля упругости материала и формы поверхности.

В зависимости от вида нарушения фрикционной связи отделение частиц материала контактирующих поверхностей происходит при разном числе взаимодействий. Износ в условиях контактных циклических нагрузок возрастает при повышении давления и увеличении коэффициента трения, а

уменьшается при увеличении модуля упругости материала и числа циклов до разрушения.

В случае усталостного изнашивания не наблюдается полной аналогии между кривой усталости и зависимостью износа от нагрузки и силы трения. Это объясняется тем, что при изнашивании влияние оказывают также сопутствующие факторы: шероховатость поверхности, упруго-пластические свойства материала, изменение структуры в процессе изнашивания и др. В случае усталостного изнашивания при упругом контакте или абразивном изнашивании факторы, влияющие на изнашивание, оказывают различное влияние.

Таким образом можно выделить основные причины, обуславливающие изнашивание поверхностей деталей при трении:

- пластическое деформирование поверхностного слоя, приводящее к его наклепу и разрушению микронеровностей;
- окислительные процессы, приводящие к образованию оксидных пленок, которые хотя и препятствуют схватыванию и глубинному вырыванию, но хрупки и быстро разрушаются;
- внедрение отдельных фрагментов поверхности одной детали в сопряженную поверхность другой, что при скольжении вызывает образование неровностей поверхностей и при многократном воздействии – их разрушение;
- адгезионное схватывание, приводящее к переносу материала одной детали на поверхность другой и усилению изнашивания;
- наводороживание поверхностей трения, ускоряющее изнашивание деталей в зависимости от условий их работы более чем на порядок.

Согласно литературным данным, приведенным выше, для более 70% изношенных деталей автомобильной техники рационально было бы повторное использование после восстановления. Это значительно снижает ресурсные затраты автотранспортных предприятий, а, кроме того, это экономически оправдано для ремонтного производства. Затраты на восстановление деталей в большинстве случаев не превышают 25–30% их стоимости, а при квалифицированном назначении технологии восстановления достигается 100%-ый ресурс. Разный срок службы автомобильных деталей обусловлен различными причинами. Основными из них являются: выполняемые функциональные назначения, разнообразный диапазон нагрузок, различные виды трения в сопряженных деталях и разные материалы, из которых они изготовлены, точность и качество обработки в сопрягаемых деталях.

Пути решения. *Нормативная надежность автомобиля* в течение его жизненного цикла обеспечивается следующим образом (рисунок 1.1).

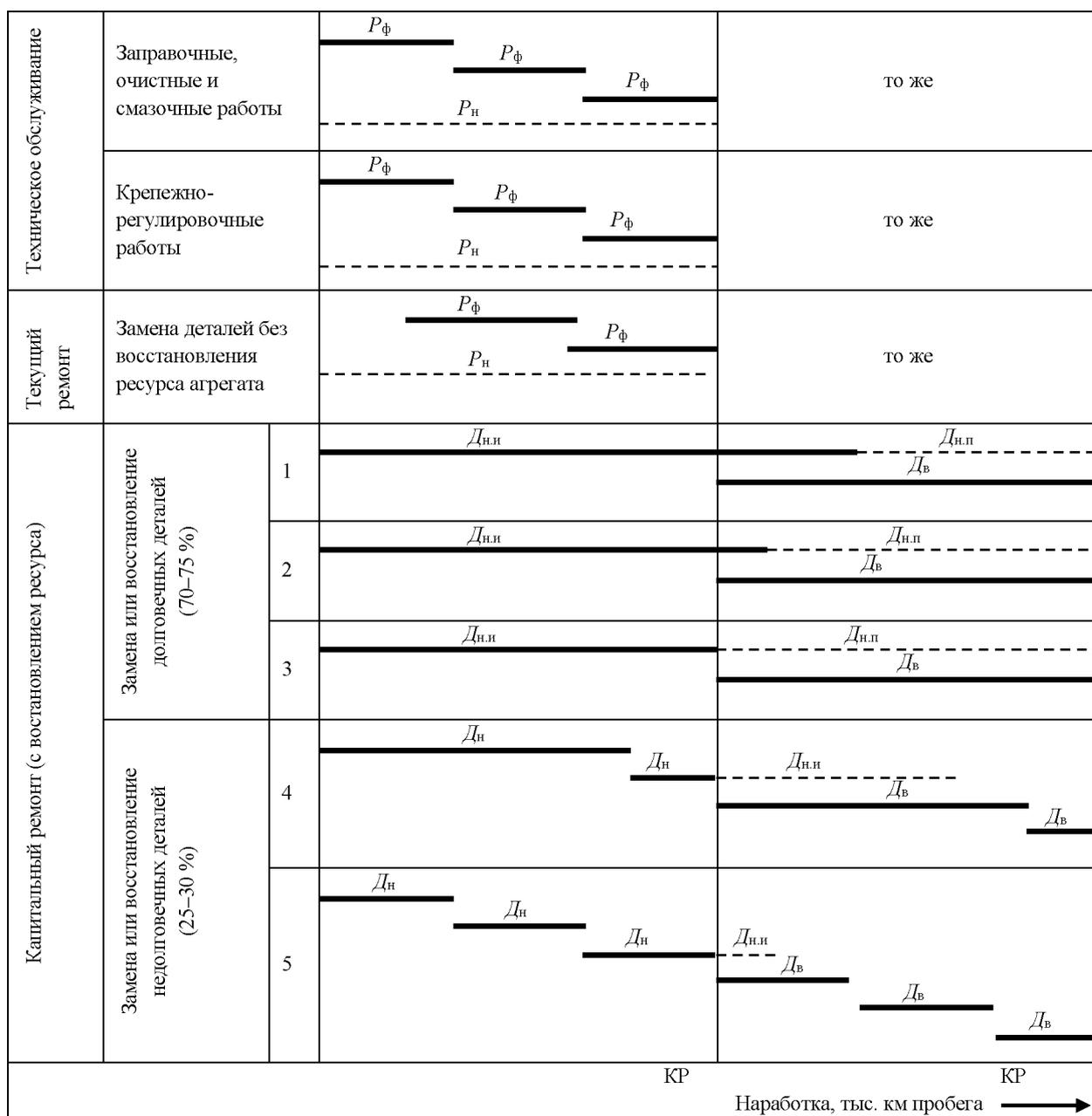


Рисунок 1.1 Обоснование необходимости технического обслуживания, текущего и капитального ремонтов в системе содержания автомобилей в работоспособном состоянии [1]: $P_ф$ – фактическая работоспособность агрегата; $P_н$ – нивелированная работоспособность агрегата ремонтными воздействиями во время его использования; $D_{н.л}$ и $D_{н.п}$ – долговечность новой детали, обусловленная износостойкостью и прочностью, соответственно; $D_в$ – долговечность восстановленной детали; КР – капитальный ремонт; 1–5 – группы деталей по долговечности

Создатели автомобиля (конструкторы, технологи, производственники) закладывают в него эксплуатационные свойства, которые обеспечивают работоспособность в течение всего срока службы при условии использования

по назначению с выполнением необходимого объема работ по техническому обслуживанию и ремонту. Несмотря на стремление создать агрегаты из деталей, достигающих предельного состояния одновременно, это по ряду причин не удается, в т.ч. вследствие использования техники в различных эксплуатационных условиях.

Техническое обслуживание продлевает время пребывания автомобиля в работоспособном состоянии за счет выполнения заправочных, очистных, смазочных и крепежно-регулирующих работ. Ремонтные работы предусматривают замену (восстановление) составных частей изделий с сопутствующими работами (очисткой, разборкой, определением технического состояния деталей и их восстановлением, сборкой, окрашиванием, обкаткой и испытаниями).

Если предельного состояния достигают одна или реже несколько неосновных деталей, то необходим текущий ремонт, который не восстанавливает ресурс агрегата. Потребность в среднем ремонте, выполняемом в эксплуатационном предприятии и восстанавливающим ресурс агрегата частично, возникает тогда, когда ограниченная нормативными документами номенклатура деталей требует замены новыми или восстановленными изделиями. Если предельного состояния достигли и основные (в т.ч. корпусные) детали, то необходим капитальный ремонт агрегата, восстанавливающий его ресурс полностью в условиях специализированного ремонтного предприятия.

Потребность, вид, объем и периодичность ремонта определяются количеством и видом деталей, достигших после определенной наработки предельного состояния или близких к нему.

Технико-экономический критерий выбора способа восстановления детали традиционно учитывает соотношение стоимости восстановленной детали, цены одноименной новой детали и их долговечностей

$$C_v \leq k_d C_n, \quad (1)$$

где C_v – стоимость восстановленной детали; C_n – цена новой детали; $k_d = D_v/D_n$ – коэффициент долговечности; D_v и D_n – долговечности восстановленной и новой деталей.

Однако выражение (1) должно быть дополнено ограничением кратности наработки восстановленных деталей межремонтному пробегу агрегата за счет использования технических решений, уравнивающих наработку деталей повышением их износостойкости.

Средние ресурсы деталей двигателей в долях ресурса их базовых деталей (блоков цилиндров), определенные опытным путем, приведены в

таблице 1. Большая долговечность базовых (корпусных) деталей, превышающая даже амортизационную наработку агрегата обусловлена отсутствием в них трущихся элементов, большой статической прочностью и жесткостью. Долговечность трущиеся детали значительно ниже долговечности корпусных деталей, что обуславливает их замену при использовании агрегата. Ряд недолговечных деталей (вкладыши коленчатого вала, поршневые кольца, поршни, уплотнения и др.) требуют более частой замены. Эти сведения позволяют обосновать номенклатуру деталей, заменяемых при различной наработке двигателей, и определить вид ремонта. При текущем ремонте заменяют наиболее изнашиваемые детали. Средний ремонт предполагает замену деталей, ресурс которые составляет примерно половину от ресурса базовой детали.

Таблица 1.1

Относительные средние ресурсы деталей двигателей

Названия деталей	Средние ресурсы в долях от ресурса базовой детали
Блок цилиндров	1,00
Шатун	1,00
Распределительный вал	0,84 – 1,00
Головка цилиндров	0,87 – 0,92
Поршневой палец	0,90 – 1,00
Гильза цилиндра	0,66 – 0,91
Коленчатый вал	0,62 – 0,69
Клапаны	0,61 – 0,92
Поршень	0,57 – 0,65
Вкладыши шатунные	0,44 – 0,52
Кольца маслосъемные	0,43 – 0,48
Кольца компрессионные	0,41 – 0,45
Вкладыши коренные	0,38 – 0,48

Мероприятия по повышению послеремонтной наработки трущихся деталей. Современное состояние науки и практики позволяет обеспечить приведенное выше ограничение. Действительно, нанесение покрытий при восстановлении трущихся поверхностей деталей с насыщением их материала необходимыми легирующими элементами подобно химико-термической обработке поверхностных слоев связано с образованием материала нового химического, структурного и фазового состава, отличного от материала основы. Насыщение поверхностных слоев, например, углеродом, азотом, бором или их сочетанием, с последующими закалкой и отпуском приводят к образованию упрочняющей фазы. Необходимо предварительно согласовать состав исходного материала покрытий с требуемым фазовым составом

образуемого покрытия. Физико-техническая обработка в виде лазерной и электронно-лучевой обработки способствует формированию такого материала. Образуется гетерогенная структура материала (типа Г. Шарпи), состоящая из твердых зерен карбидов, нитридов или других соединений, равномерно распределенных в упругопластической стальной матрице, при этом поверхностные слои трущихся материалов должны обладать меньшей прочностью, чем нижележащие слои (правило положительного градиента) и не наклепываться при трении.

Совершенствование обслуживающе-ремонтного цикла. Исходя из рассмотрения соотношения стоимости ремонта и послеремонтной наработки агрегатов с использованием новых и восстановленных деталей предлагается ремонтный цикл в трех видах (рисунок 1.2), составленный из фрагментов эксплуатационного цикла (без использования по назначению и технического обслуживания), включающий в зависимости от наработки ремонты различных категорий и отличающийся от базового цикла наличием среднего ремонта с использованием заранее подготовленного ремонтного комплекта деталей. Если ремонтный цикл агрегатов охватывает несколько лет, в течение которых автомобили данной марки морально устаревают, то из цикла исключают капитальный ремонт. Периодичность капитального и среднего ремонта планируют, периодичность текущего ремонта планировать невозможно. Предложенный ремонтный цикл предполагает ограничение числа восстановлений деталей и соответственно трудоемких ремонтов. Восстановительное покрытие на отдельную поверхность наносят один раз.

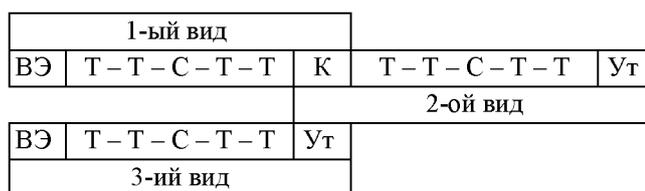


Рисунок 1.2. Ремонтные циклы агрегатов машин: ВЭ – ввод в эксплуатацию; Т – текущий ремонт по результатам диагностирования при техническом обслуживании; С – средний ремонт; К – капитальный ремонт; Ут – утилизация

Средний ремонт агрегатов, который следует вернуть в систему ТО и ремонта, предполагают использование специально подготовленного в условиях авторемонтного завода *ремонтного комплекта деталей* (таблица 2) с восстановлением параметров формы и расположения отверстий под подшипники, гильзы и стаканы в корпусных деталях (у блока цилиндров – коренных опор хонингованием без нанесения покрытий). Часть деталей комплекта составляют приобретенные запасные части, вторую его часть

изготавливают на ремонтном предприятии, а оставшуюся часть – восстанавливают.

Таблица 1.2

Состав ремонтного комплекта деталей бензинового двухрядного
восьмицилиндрового двигателя

Деталь (количество в комплекте)	Источник комплектования
Гильза цилиндра (8)	Растачивание и хонингование под ремонтный размер Изготовление из отливки обработкой резанием
Прокладка гильзы цилиндра (24)	Изготовление штамповкой
Прокладка крышки распределительных шестерен (1)	
Стопорное кольцо (16)	
Прокладка головки цилиндров (1)	Приобретение
Комплект поршневых колец (1)	
Комплект вкладышей шатуна (1)	
Комплект вкладышей коренных подшипников (1)	
Набивка сальника (2)	
Поршень (8)	Шлифование юбки, восстановление канавок под кольца, развертывание отверстия под поршневой палец Изготовление из отливки обработкой резанием с нанесением прирабочного покрытия
Поршневой палец (8)	Хромирование или термопластическая раздача, шлифование
Шатун в сборе (8)	Железнение поверхности в нижней головке, хонингование, замена втулки верхней головки, растачивание
Коленчатый вал (1)	Шлифование и полирование шеек под ремонтные размеры Напыление или наплавка шеек, их шлифование под номинальный размер и полирование
Выпускной клапан (8)	Железнение стержня, наплавка фаски, шлифование
Уплотнительная прокладка заднего сальника (2)	Изготовление из «сырой» резины вулканизацией в прессформе
Маслоотражательный колпачок впускного клапана (8)	
Уплотнительная прокладка клапанной крышки (1)	
Задняя прокладка впускной трубы (1)	
Боковая прокладка впускной трубы (2)	
Передняя прокладка впускной трубы (1)	

Практическое использование предложенного ремонтного цикла агрегатов позволяет более полно использовать остаточную долговечность

деталей с достижением нормативной послеремонтной наработки при уменьшении стоимости ремонта.

В таблице 1.3 приведены рекомендации к восстановлению исходных размеров и механических свойств деталей из сталей различного класса.

Таблица 1.3 – Рекомендуемые способы восстановления размеров и механических свойств поверхностей при различных классах сталей

Материал, класс, представитель	ВКН	Азотирование	Гальваника	Лазерная модификация	ФАБО	Электроискровое легирование	Физико-механические характеристики
Р9	+	+	+/-	+	+/-	+	1
	+	+	+/-	+	-	+	2
	+	+	?	+	-	+	3
	+	-	+	+/-	+/-	+/-	4
18Х2Н3А	+	-	+/-	+	+/-	+	1
	+	-	+/-	+	-	+	2
	+	-	+	+	?	+	3
	+	-	+	+/-	-	+/-	4
ХВГ	+	+/-	+/-	+	+/-	?	1
	+	+/-	+/-	+	-	+	2
	+	+/-	+	+	?	+	3
	+	-	+	+/-	-	+/-	4

1 – Повышение износостойкости; 2 – Повышение твердости; 3 – Работоспособность при повышенных температурах; 4 – Возможность восстановления размеров, формы; ? – Необходимы дополнительные исследования; + – Уверенно «Да»; +/- – Проблематично; -- – Уверенно «Нет»

Для восстановления поверхностей деталей из сталей типа Р9 необходимо использовать азотирование в связке с лазерным модифицированием рабочих поверхностей. По литературным данным неплохие результаты для данного класса сталей отмечается для вакуумно-конденсационного напыления (ВКН), в частности с применением установки типа «Булат». Рекомендуемым материалом для восстановления может служить нитрид титана.

Для ремонта поверхностей деталей из сталей типа 18Х2Н3А целесообразно рекомендовать проведение цементации с последующей закалкой при изготовлении детали, и при проведении ремонтных работ с применением селективной сборки, использовать вакуумно-конденсационное напыление (ВКН). При применении ремонтных технологий для восстановления размеров и получения поверхностной твердости порядка 55–60 HRC, рекомендуется применения гальванотехнологий, в частности нанесение твердого хрома. Не плохие результаты для данного класса материалов получены при применении технологии финишной антифрикционной безабразивной обработке (ФАБО), нанесением латунного покрытия [13]. Также неплохо зарекомендовал себя способ электроискрового нанесения материала, однако при его применении возникали некоторые трудности с применением оснастки для сохранения неподвижной горизонтальной оси детали, поскольку геометрические размеры детали зачастую не предусматривают протяженных технологических баз.

Поскольку износ рабочей поверхности и поверхности направляющей, как правило, не значительный, можно применять процессы восстановления, связанные с образованием дополнительных упрочняющих фаз. Наилучшие результаты выявлены при азотировании материала. При этом в выявленной зоне упрочнения материала наличие нитридов, входящих в составе эвтектик, способствует как приработке трибосопряжения, так и минимальным показателям износа при режиме установившегося изнашивания.

Данный эффект объясняется тем, что азотирование материала проходит при температуре 560–580 °С, при этом в зоне выявленного поверхностного наклепа происходит снятие скопившихся напряжений и рекристаллизация структуры материала поверхностного слоя. Таким образом, указанные явления и плюс наличие нитридов в поверхностном слое, показывающих наибольшую стойкость при рабочей температуре 500–600 °С, могут объяснить минимальные значения износа трибопары при такой технологии восстановления.

Стали класса ХВГ рекомендуется подвергать как вакуумно-конденсационному напылению (ВКН), так и лазерному модифицированию с последующим полированием сопрягаемых поверхностей.

В заключение восстановительных операций необходимо предусмотреть механическую обработку. В одном случае это будет шлифование или полирование, в другом случае – должна быть предусмотрена притирка деталей, если наносят покрытие минимальной толщины. В различных литературных источниках указаны различные параметры износа деталей,

восстановленных данными способами [13, 16]. Однако, с нашей точки зрения, следует рассматривать не износ отдельной детали, сколько бы он не был мал, а износ трибосопряжения в целом. Для рассматриваемых трибопар в данных условиях эксплуатации – это большое поле исследовательской деятельности.

Диагностирование двигателей с использованием современных информационных технологий.

Для успешного выполнения ремонтно-восстановительных работ необходимо заранее локализовать узел либо деталь, над которой необходимо выполнить восстановительные операции. Для этой цели выявляют проблемное место при помощи средств диагностики.

Одни и те же внешние признаки неисправности автомобиля могут возникать по различным причинам. Поэтому в некоторых случаях диагностика традиционными методами может занимать до нескольких дней. Это необходимо, чтобы выявить все проблемы и правильно произвести ремонт.

Снизить количество затраченного времени и трудоемкость выполнения диагностических работ позволяет технология диагностирования двигателей с использованием современных информационных технологий. С данной целью были разработаны методики диагностирования CSS и Pх.

Для комплексного диагностирования бензинового двигателя с целью выявления неисправностей в какой-либо из систем используются методики, основанные на применении классических средств диагностирования. Например, для оценки состояния цилиндропоршневой группы используется компрессометр, который измеряет пиковое давления в цилиндре при прокрутке двигателя стартером. Для проверки топливной системы используется топливный манометр, позволяющий оценить давление в системе, а также различные стенды для проверки форсунок с их снятием с двигателя, позволяющие оценить их производительность, качество распыла, эффективность. Для проверки системы зажигания используют: стенды для проверки свечей зажигания, тестеры сопротивления и т.д. При использовании этих методов диагностирования (определим их как традиционные) в зависимости от марки и модели автомобиля тратится достаточно много времени, что существенно снижает показатели эффективности диагностирования. [29]

Однако за последние годы в сферу диагностирования двигателей внедряются и нестандартные методики с использованием современных информационных технологий, которые призваны повысить эффективность и снизить трудоемкость работ.

В ходе исследования было проведено диагностирование двигателей различных марок автомобилей 2-мя методами. В первом случае

использовались традиционные технологии, во втором случае в начале процесса использовался мотортестер с программами диагностирования CSS и Rx. Результаты исследований приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4 – Трудоемкость диагностирования различных автомобилей с использованием традиционных методов и предложенного алгоритма поиска неисправностей.

Марка автомобиля	Признаки неисправностей	Неисправность	Трудоемкость с использованием традиционных методов, чел·ч	Трудоемкость с использованием предложенного метода чел·ч
Mazda 626 2,0 2000 г.	Потеря мощности и нестабильная работа двигателя под нагрузкой	Пробой изолятора свечи зажигания;	0,5	0,25
VW Polo 1,6 2015 г.		Увеличенный зазор свечи зажигания	0,5	0,3
VW Golf IV 2002 г.		Загрязнение изолятора свечи зажигания	0,6	0,3
Fiat Marea 1,6 1996 г.	Неравномерность работы двигателя	Неисправность форсунки 1-го цилиндра	3,8	0,5
Renault Logan 2009г.		Загрязнение форсунок	1	0,6
Lada Vesta 2016 г.		Обрыв цепи управляющего провода форсунки	0,6	0,3
VW Tiguan 1,6 TFSI 2008 г.		Неисправность форсунки 3-го цилиндра	1	0,4
Hundai Sonata 2.0 1997г.	Нестабильная и неравномерная работа двигателя на всех режимах	Сломанное компрессионное кольцо	0,8	0,6
Peugeot 406 2003 г.		Износ поршневых колец	1	0,5

Audi 100 C3 1986 г.		Неправильная установка ремня ГРМ	1,5	0,6
Fiat Bravo 1,4 2010 г.		Прогар клапана ГРМ	1	0,6

В частности была измерена компрессия в цилиндрах при помощи компрессометра, оценено давление в топливной системе при помощи топливного манометра, а также при помощи стенда для проверки форсунок были оценены производительность, качество распыла и эффективность. Для проверки свечей зажигания использовали специальный стенд, а для определения сопротивления высоковольтных проводов и сопротивления катушек зажигания использовали мультиметр [30].

Затем выполнили диагностирование с помощью теста CSS и сравнили затраченное время в первом и во втором случае и эффективность результатов.

Для примера приводится автомобиль Fiat Marea 1,6 1996 г. В случае с данным автомобилем было конкретное проявление неисправности, которое проявлялось в виде неравномерной работы двигателя на всех режимах.

Для этого автомобиля сначала был выполнен тест CSS, а затем проведены проверки по традиционным методикам. При этом подключение датчиков и методика аналогична. В этом автомобиле датчик коленчатого вала расположен таким образом, что для подключения к нему понадобилась осмотровая канава (подключение к датчику осуществлялось снизу автомобиля) (рисунок 1.3.).



Рисунок 1.3.. Подключение осциллографического щупа к сигнальному проводу датчика коленчатого вала.

Поэтому время на подключение и анализ результатов составило около 30 минут. При анализе было замечено, что график эффективности 1-го цилиндра находится ниже остальных на всех режимах работы (рисунок 1.4).

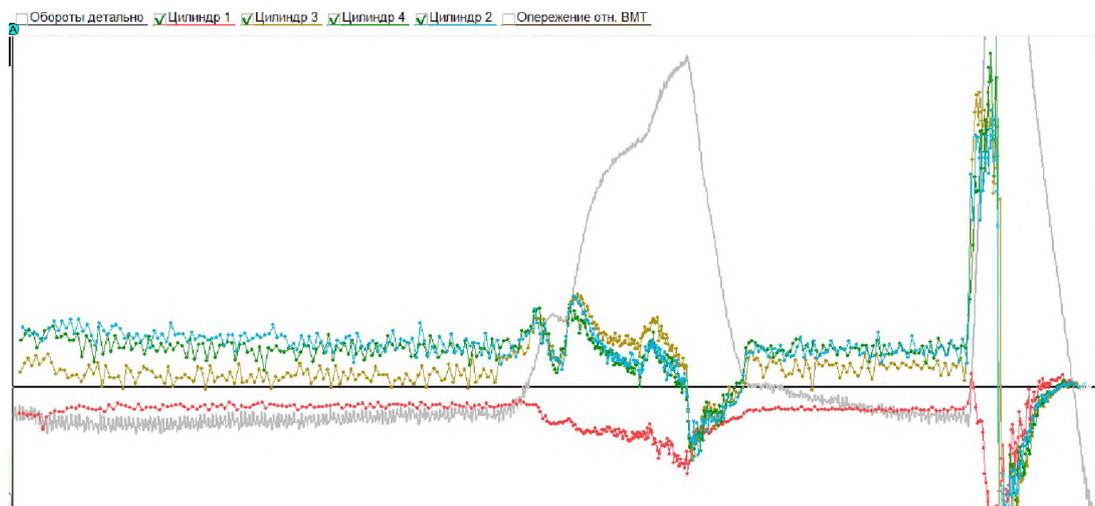


Рисунок 1.4. Загрязнение топливной форсунки в 1-ом цилиндре.

Такое расположение графика свидетельствует о том, что форсунка не подаёт достаточное количество топлива, поэтому в цилиндр подается бедная смесь. Проблемы в цилиндропоршневой группе и в системе зажигания при помощи данного теста выявлены не были.

Затем было проведено диагностирование основных систем двигателя автомобиля Fiat Marea с применением традиционных методов. Если демонтаж свеч, их проверка на стенде, проверка катушки, высоковольтных проводов и измерение компрессии, а также определения давления в топливной системе не заняло много времени (44 минут), то проверка форсунок на стенде потребовала снятия впускного коллектора и использования для этого подъемника. Поэтому время, затраченное на эту операцию, оказалось существенным (184 минут). А общее время составило 228 минут.

При проверке элементов системы зажигания, при оценке результатов измерения компрессии и давления в топливной системе не было выявлено неисправностей как при первом тесте. А вот при оценке работы форсунок на стенде было выявлено, что форсунка 1-ого цилиндра имеет более низкие показатели производительности, чем другие форсунки на всех режимах работы (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5. Проверка форсунок на стенде. Низкая производительность форсунки 1-ого цилиндра.

После очистки форсунок в ультразвуковой ванне (рисунок 1.6) результат остался прежним, поэтому было принято решение заменить форсунку на новую.



Рисунок 1.6. Промывка форсунок в ультразвуковой ванне.

После замены форсунки и установки ее на автомобиль был повторно произведен тест CSS, который указал на одинаковую эффективность всех цилиндров (рисунок 1.7).

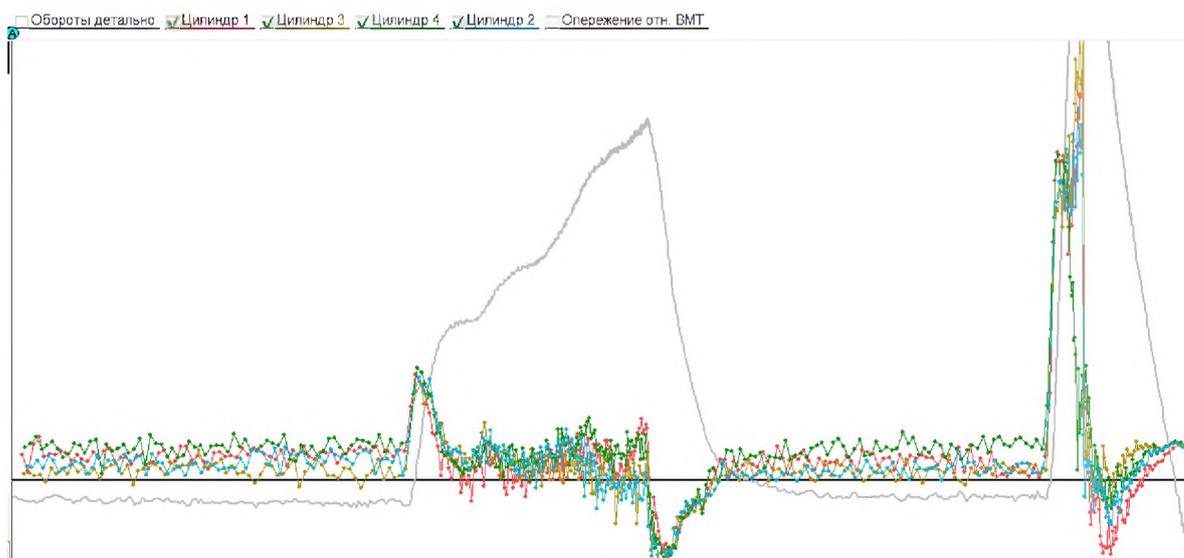


Рисунок 1.7. Эффективность работы цилиндров автомобиля Fiat Marea после замены форсунки 1-ого цилиндра.

Далее было произведено диагностирование еще одного автомобиля с целью определения конкретных неисправностей при помощи теста CSS для того, чтобы убедиться в его результативности. В данном случае – это автомобиль Mazda 626 2,0 16 v 2000 г. Этот автомобиль также имел признаки неисправности, которые характеризовались как потеря мощности и нестабильная работа двигателя под нагрузкой.

После проведения теста CSS, который занял около 15 минут, во вкладке «Эффективность» заметно отклонение красного и желтого графиков отражающих эффективность работы первого и третьего цилиндра (рисунок 1.8).

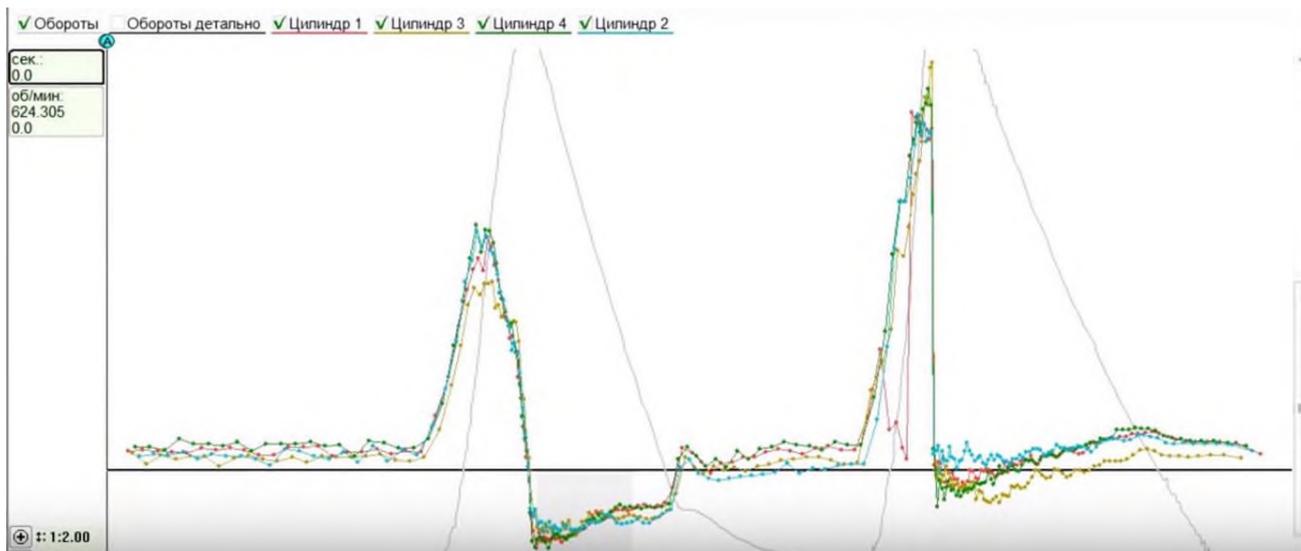


Рисунок 1.8. Отклонение красного и желтого графиков.

По графику эффективности первого цилиндра видны пропуски воспламенения во время резкой перегазовки, что указывает на проблему с искрообразованием в первом цилиндре (рисунок 1.9).

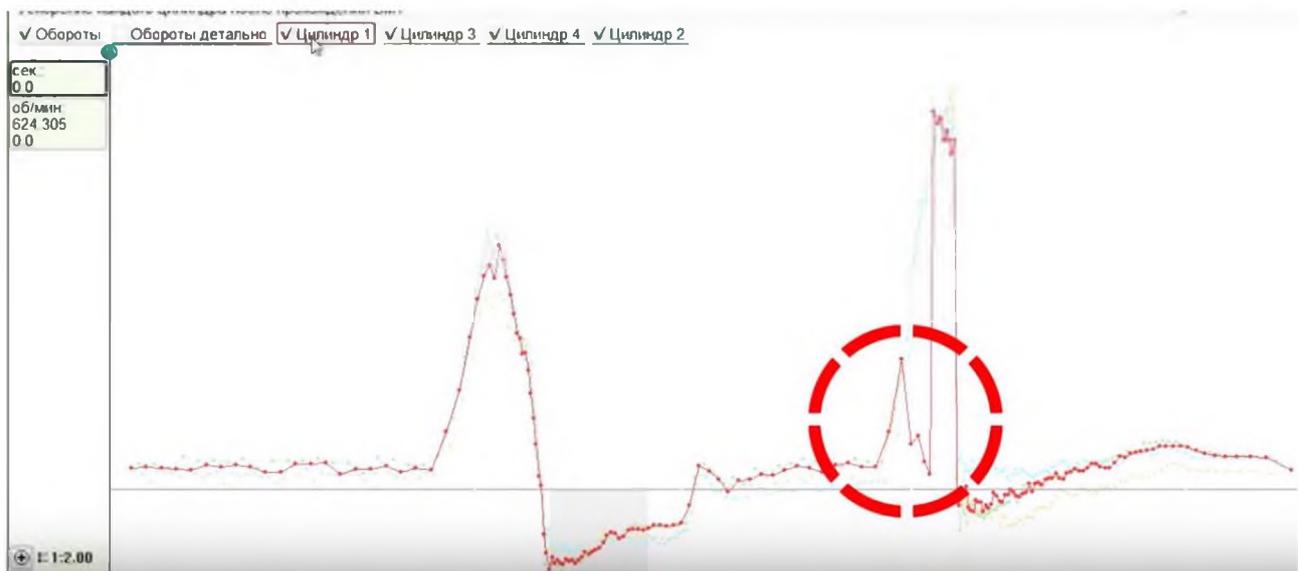


Рисунок 1.9. Проблема с искрообразованием в 1-ом цилиндре.

Отклонение в конце графика эффективности третьего цилиндра указывает на проблему с компрессией, что стало причиной снижения мощности отдаваемого этим цилиндром (рисунок 1.10).

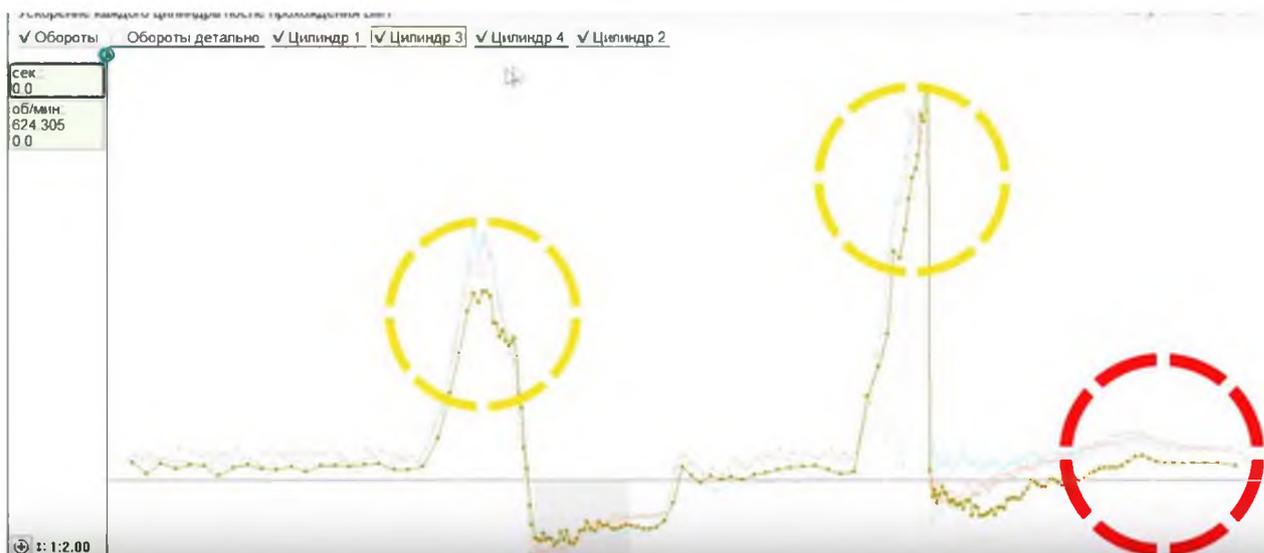


Рисунок 1.10. Проблема с компрессией.

Графики эффективности второго и четвертого цилиндров не содержат признаков неисправности.

Как оказалось, пропуски воспламенения в первом цилиндре под нагрузкой возникли из-за пробитой по изолятору свечи зажигания и ее высоковольтного наконечника (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11. Пробитая по изолятору свеча зажигания и ее высоковольтный наконечник.

А причиной снижения компрессии в третьем цилиндре был прогоревший клапан (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12. Прогоревший клапан.

Тест Pх.

Для выполнения диагностических процедур в комплект мотортестера входят датчики, предназначенные для измерения давления. Для получения осциллограммы давления в цилиндре двигателя без воспламенения в этом цилиндре применялся датчик давления Pх35 (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13. Датчик давления Px35.

Для отображения осциллограммы давления в цилиндре используется режим «Px». В этом режиме отображался график давления в цилиндре без воспламенения вместе с импульсом синхронизации с моментом зажигания. График давления в цилиндре кроме прочего, содержит информацию о моментах открытия / закрытия впускных / выпускных клапанов газораспределения.

Датчик давления вворачивался в диагностируемый цилиндр двигателя на место свечи зажигания. Разъём датчика давления подключался к одному из каналов мотортестера. Высоковольтный провод цилиндра подключался к искровому разряднику с зазором ~5 мм. Разрядник при помощи зажима типа «крокодил» подключался к «массе» двигателя. Датчик синхронизации мотортестера устанавливался на этот же высоковольтный провод и подключался к соответствующему входу мотортестера.

Затем запускался диагностируемый двигатель и в окне программы мотортестера выбирался режим измерения давления в цилиндре. Для уменьшения погрешности измерений, возникающей вследствие неравномерности вращения коленчатого вала двигателя, проводились измерения при несколько повышенной частоте его вращения на холостом ходу без нагрузки, примерно, при 1200 об/мин.

Положение характерных точек и участков графика давления в цилиндре бензинового двигателя внутреннего сгорания позволяет определить взаимное положение коленчатого и газораспределительных валов, а измерение и сравнение значений абсолютного давления в цилиндре в некоторых характерных точках графика позволяет определить состояние диагностируемого цилиндра. На рисунке 1.14 приведен график давления в цилиндре с характерными точками и участками, которые отмечены буквами. [31]

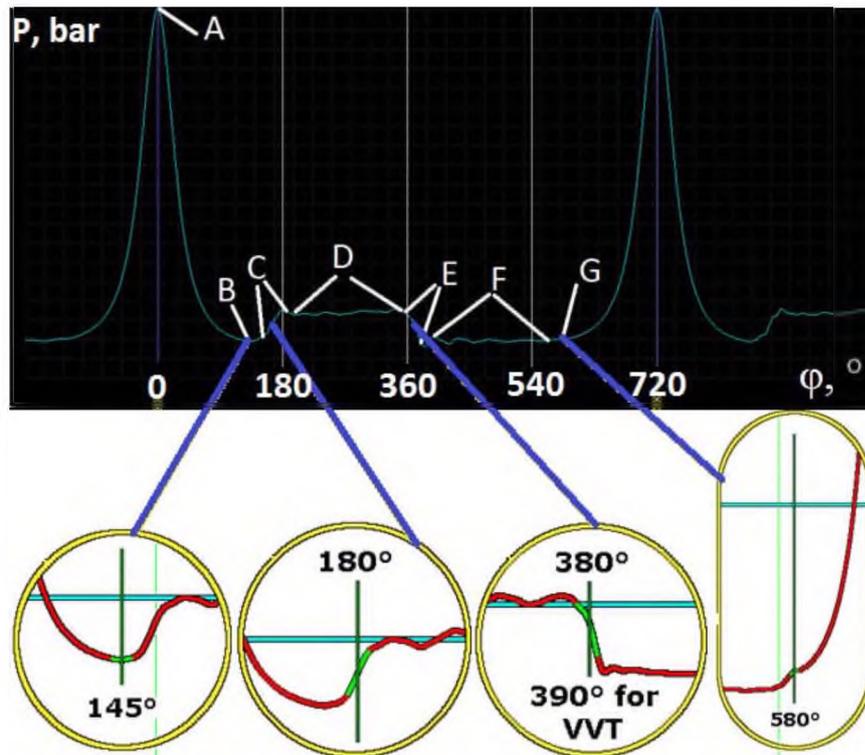


Рисунок 1.14. График зависимости давления в цилиндре P от угла поворота коленчатого вала φ (двигатель работает на холостом ходу).

При диагностировании двигателей различных марок автомобилей по анализу осциллограмм давления в цилиндре был выявлен ряд неисправностей в системах ГРМ и ЦПГ.

1. Автомобиль Audi 100 С3 1986 г. имел признак неисправности, который проявлялся в виде неравномерной работы двигателя на всех режимах. Тест CSS не выявил неисправностей, следующим шагом было проведение теста Рх. Осциллограмма давления в цилиндре данного автомобиля имела вид, представленный на рисунке 1.15.

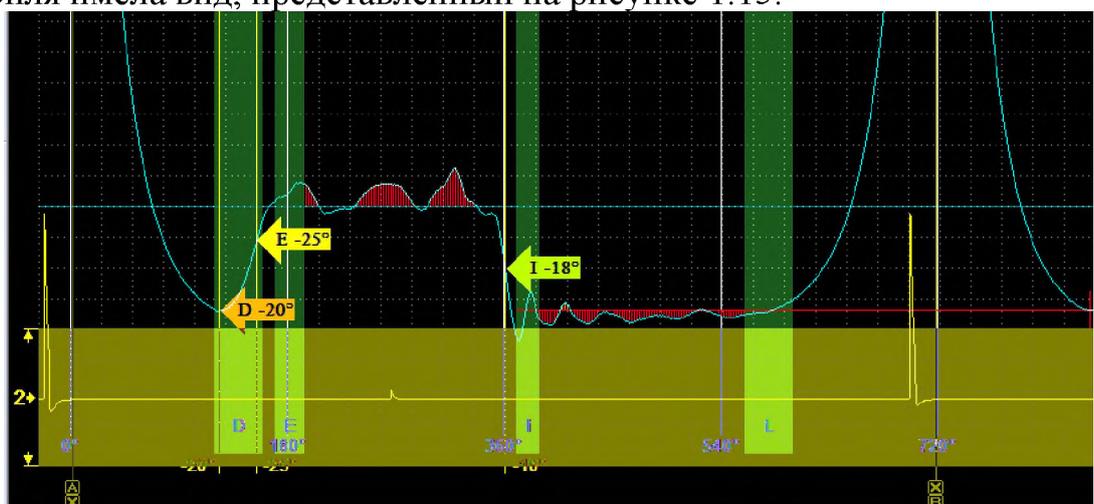


Рисунок 1.15. Осциллограмма давления газов в цилиндре автомобиля Audi 100 С3.

На осциллограмме видно, что точки начало открытия выпускного клапана, полного открытия выпускного клапана и перекрытия клапанов смещены в сторону раннего открытия на 20° , 25° и 18° соответственно. Это свидетельствует о том, что распределительный вал смещен относительно коленчатого вала по часовой стрелке, что свидетельствует о неправильной установке ремня ГРМ при его замене (ремень ГРМ был смещен на 2 зуба относительно имеющихся меток).

2. Автомобиль Fiat Marea 1,6 1996 г. Этот автомобиль также имел признаки неисправности, которые характеризовались как плохой запуск двигателя, потеря мощности и нестабильная работа двигателя под нагрузкой. Осциллограмма давления в цилиндре данного автомобиля имела следующий вид (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16. Осциллограмма давления газов в цилиндре автомобиля Fiat Marea 1,6 1996 г.

Противодавление в выпускном тракте превысило $0,50 \text{ bar}$ и составило $0,89 \text{ bar}$, причиной этого являлся забитый катализатор.

3. Автомобиль Hyundai Sonata 2.0 1997. Двигатель автомобиля Hyundai Sonata работал нестабильно на всех режимах. По осциллограмме давления в 1-ом цилиндре было выявлена низкая динамическая компрессия (рисунок 3.15).

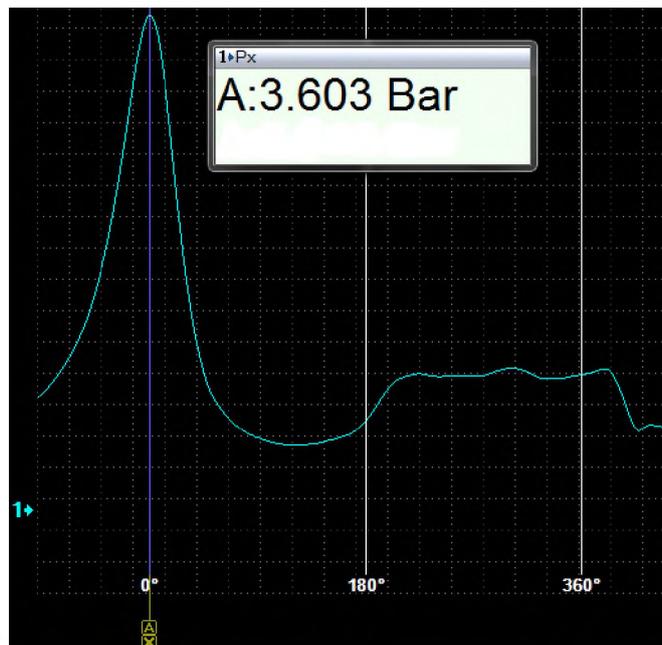


Рисунок 1.17. Осциллограмма давления в цилиндре автомобиля Hyundai Sonata 2.0 1997.

Причиной нестабильной работы, а, следовательно, и низкой компрессии оказалось сломанное компрессионное кольцо в 1-ом цилиндре.

Осциллограммы давления газов позволяют получить большое количество достаточно информативных диагностических параметров таких как: динамическая компрессия, начало открытия выпускных клапанов, полное открытие выпускных клапанов, момент перекрытия клапанов, момент конца закрытия впускных клапанов, противодействие во впускном коллекторе, противодействие в выпускном коллекторе, симметрия фаз газораспределения, угол опережения зажигания. Эти диагностические параметры позволяют в полной мере судить о состоянии ЦПГ и ГРМ бензинового двигателя независимо от марки и модели автомобиля.

Методика получения осциллограммы давления в цилиндре проста и не трудоемка, поэтому может заменить классические методы диагностирования ЦПГ и ГРМ, а также применяться как экспресс-диагностика для большинства бензиновых двигателей.

Выводы.

1. Обосновано возвращение среднего ремонта агрегатов в систему технического обслуживания и ремонта автомобилей с обоснованием заменяемого при нем комплекта деталей.

2. Предложенные меры по упрочнению деталей, позволяющие достичь нормативной наработки.

3. Диагностирование систем и механизмов бензиновых двигателей обладает большой трудоемкостью. Предложена технология диагностирования бензиновых двигателей внутреннего сгорания, которая уменьшает трудоемкость процесса в 1,8–2,0 раза за счет использования

алгоритма поиска неисправностей двигателя с помощью мотортестера USB AUTOSCOPE IV с информационным обеспечением «CSS» и «Рх».

Раздел 2. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛОВ

Детали типа «вал» составляют большую часть номенклатуры восстанавливаемых деталей автомобиля. В большинстве случаев именно эти детали лимитируют ресурс их узлов и агрегатов. Коэффициент их восстановления при капитальном ремонте машин составляет 0,25–0,95. Длина восстанавливаемых валов составляет 100–4000 мм, однако более 90 % этих деталей имеют длину не более 1000 мм. Диаметры валов равны 12–210 мм, но у 98 % валов диаметр не превышает 60 мм. Среднее значение массы составляет около 3 кг.

У деталей типа «вал» наиболее часто дефекты появляются на посадочных поверхностях под подшипники и резьбовых поверхностях.

Поверхности под подшипники восстанавливают при износе более 0,017–0,060 мм; поверхности неподвижных соединений (места под ступицы со шпоночными пазами и др.) за счет дополнительных деталей – при износе более 0,04–0,13 мм; поверхности подвижных соединений – при износе более 0,4–1,3 мм; под уплотнения – более 0,15–0,20 мм. Шпоночные пазы восстанавливают при износе по ширине более 0,065–0,095 мм; шлицевые поверхности – при износе более 0,2–0,5 мм [2].

Из всей совокупности восстанавливаемых поверхностей валов 46 % изнашиваются до 0,3 мм; 27 % – от 0,3 до 0,6 мм; 19 % – от 0,6 до 1,2 мм и 8 % – более 1,2 мм.

Основным требованием, которое необходимо выполнить при восстановлении валов, является обеспечение размеров и шероховатости восстанавливаемых поверхностей, их твердости, сплошности покрытия, прочности сцепления нанесенных слоев с основным металлом, а также соосности, радиального и торцового биений обработанных поверхностей, параллельности боковых поверхностей зубьев шлицевых и шпоночных пазов оси вала.

Валы автомобильной техники изготавливают преимущественно из среднеуглеродистой и низколегированной сталей. Их шейки подвергают поверхностной закалке токами высокой частоты, цементации с последующей закалкой, нормализации.

Дефекты деталей автомобилей принято делить на три группы: механические повреждения, химико-тепловые повреждения и износ. Повреждения деталей механическим способом происходит в результате

повреждения его поверхности трещинами, рисками и задирами, а так же возможен изгиб вала, его поломка или скручивание.

В ряде случаев на рабочих поверхностях деталей образуются риски и задиры, особенно часто это происходит в соединениях «вал-подшипник скольжения», вследствие загрязнения смазки или абразивного действия частиц чужеродного происхождения.

На поверхности деталей могут образовываться трещины микрометрических размеров, вследствие воздействия избыточных местных нагрузок, ударов от воспламенения рабочей смеси или иного рода, а также перегруженности вала. Появление данного дефекта возникает в наиболее нагруженных местах деталей – на границе опорной поверхности. Особенно часто данный дефект встречается в коленчатых и распределительных валах двигателя внутреннего сгорания автомобилей. Больше всего трещинам подвержены валы, изготовленные из высокопрочного чугуна. Кроме трещин, возникающих в результате воздействия сил ударного характера, появляются усталостные трещины в наиболее напряженных местах деталей в результате продолжительного воздействия знакопеременных нагрузок. В ряде случаев трещины могут появляться в результате теплового воздействия. В редких случаях от воздействия большого крутящего момента, связанного с преодолением временных значительных сопротивлений при работе, распределительные валы подвержены скручиванию[14,16].

Дефекты химико-теплового характера возникают в результате сложных взаимодействий при тяжелых условиях работы узлов и агрегатов, в которых они установлены. К таким повреждениям относятся: коробление, коррозия, раковины и другие. Данные повреждения встречаются реже, по сравнению с другими.

Коробление деталей происходит в результате воздействия высокой температуры, например при нарушении правил эксплуатации автомобилей, приводящих к возникновению структурных изменений и больших внутренних напряжений. В редких случаях происходит коррозионный процесс, то есть разрушение металла вследствие химического или электрохимического взаимодействия с коррозионной средой. Поскольку подавляющее большинство технологических сред представляет собой электролиты, то основным видом коррозии оборудования является электрохимическая коррозия.

У деталей автомобилей, в том числе распределительного вала, встречается коррозия сплошная (равномерная и неравномерная) либо местная. Коррозия со сплошной площадью покрытия заключается в постепенном уменьшении

первоначальной толщины поверхности детали, при этом возможен расчет ее скорости заранее, используя данные по коррозионной стойкости конструкционных материалов в конкретных технологических средах. Но большее вредное воздействие представляет местная (избирательная) коррозия. Основными причинами появления местной коррозии, т. е. коррозии, охватывающей отдельные участки поверхности деталей автомобилей, являются как внутренние факторы (непостоянство структуры и свойств материала, состояние поверхности, неоднородное напряженное состояние в элементах конструкции и т.п.), так и внешние факторы, определяемые, прежде всего, условиями взаимодействия металла со средой (температура, давление, время, условия контактирования, состав коррозионной среды и т. п.).

Разнообразие условий эксплуатации обуславливает различные виды изнашивания рабочих поверхностей деталей автомобилей. Для валов характерными видами изнашивания являются абразивное, коррозионно-механическое, гидроабразивное, гидроэрозионное и кавитационное.

Наиболее распространенным видом дефектов является коррозионно-механическое изнашивание, происходящее в результате механических воздействий, сопровождающихся химическим или электрохимическим воздействием среды на металл. В результате совместного воздействия механического и коррозионного факторов в поверхностных слоях металла происходят взаимосвязанные явления, способствующие активации процессов упругопластического деформирования, химических и электрохимических реакций и др. К наиболее распространенному виду коррозионно-механического изнашивания относят, прежде всего, разрушение металлов за счет трения сопрягаемых поверхностей при недостаточной смазке или ее отсутствии которое сопровождается одновременным воздействием на поверхность металла коррозионной среды и сил трения.

Возможно гидроабразивное изнашивание, происходящее в результате воздействия на поверхность металла твердых абразивных частиц, взвешенных в жидкости и перемещающихся относительно изнашиваемой поверхности.

В некоторых случаях возможным дефектом является изнашивание при заедании, то есть изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на соединенные поверхности. При трении сопрягаемых поверхностей адгезионная связь вносит вклад в силовое взаимодействие. Разрыв фрикционной связи происходит по плоскостям максимальных касательных напряжений и локализуется для шероховатых

поверхностей в теле микронеровностей. Изнашивание при схватывании проявляется при отсутствии смазочных пленок и поверхностных структур, локализирующих линии пластического течения в тонких поверхностных слоях. В этих случаях плоскости максимальных напряжений распространяются в более глубокие от поверхности контакта слои и существенно увеличивают объем деформируемого материала. Разрушение материала происходит на значительной от поверхности глубине, а часть отделившегося материала налипает на поверхность соединенной детали. Если усилие сдвига превышает уровень движущихся сил, относительное движение деталей прекращается и происходит задир соединенной пары. Такой вид изнашивания является катастрофическим, приводящим к быстрому отказу узла трения.

Анализ причин неисправности деталей типа «вал» показал, что большей частью (более 70 %) основных дефектов является изнашивание деталей, которые работают в соединениях типа «вал-подшипник скольжения».

В автомобильной технике соединения типа «вал-подшипник скольжения» применяют в кривошипно-шатунном механизме и цилиндропоршневой группе (коленчатый вал – вкладыши, поршневой палец – верхняя головка шатуна, поршневой палец – бобышки поршня), в головке цилиндров (ГЦ) (распределительный вал – ГЦ), в подвеске автомобиля (шкворень – цапфа поворотного кулака), в турбокомпрессоре (вал ротора – втулка подшипника). При эксплуатации автомобилей в этих соединениях возникает естественный износ, приводящий к поломке и отказу данного узла или всего агрегата. В ходе ремонта в более 50% случаев, помимо износа корпусной втулки требуется замена либо восстановление вала, также из-за износа, причем стоимость втулок составляет 5–10% от стоимости самих валов.

Основная масса дефектов распределительного вала сводится к значительному износу и задирам на поверхностях кулачков и шеек, трещинам, царапинам на поверхностях под сальники, разрушению крепежных отверстий или резьбы в них, а также шпоночных пазов и посадочных мест под штифты, шкивы и шестерни (рис. 2.1).

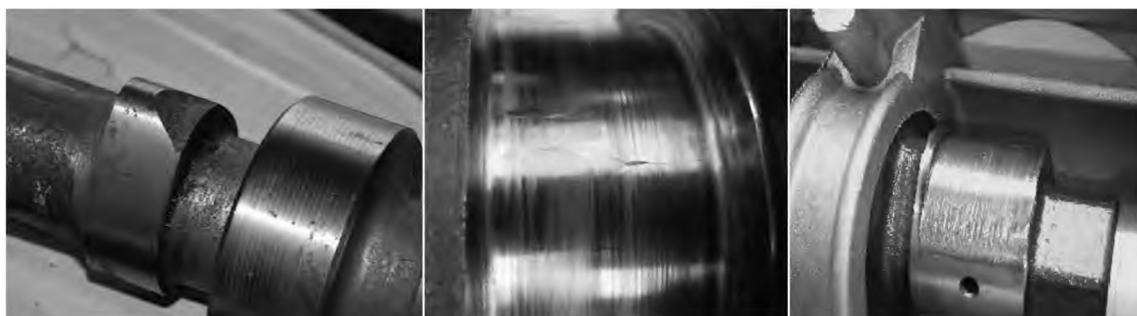


Рисунок 2.1 - Виды дефектов распределительного вала

Причины, вызывающие многие из вышеперечисленных дефектов, аналогичны с причинами изнашиванию коленчатого вала двигателя: недостаточное давление в системе смазки, недостаточный уровень масла, некачественное масло, сильный перегрев, приводящий к разжижению масла, попадание в масло бензина (дизельного топлива), приводящее к разжижению масла, засоренного масляного фильтра, и работа двигателя на грязном масле.

Факторы, влияющие на скорость, форму и глубину износа кулачка по степени их важности, можно расположить в следующем порядке :

1. форма и размеры толкателя;
2. форма и размеры кулачка;
3. соединение распределительного вала с остальными деталями (поверхность постели распределительного вала);
4. соединение распределительного вала с остальными деталями (подшипники скольжения);
5. скорость вращения распределительного вала;
6. материалы кулачка и толкателя;
7. величина и направление сил, действующих между кулачком и толкателем (сила разжимных пружин клапана), давление между кулачком и толкателем (зависящее от величины сил и площади контакта);
8. условия работы (смазка, температура, попадание инородных тел, абразивных элементов, частиц стружки);
9. масса деталей, входящих в работу механизма, моменты инерций;
10. прочие особенности.

В качестве способа восстановления рабочей поверхности вала был выбран способ наплавки с технологическими характеристиками:

Таблица 2.1 – Режимы наплавки

Параметры	ПГ-19М-01	ИЧХ18
Наплавка вершины кулачка		
Сила тока, А	120-140	–
Напряжение, В	25	–
Наплавка цилиндрической поверхности кулачка		
Сила тока, А	160-170	180-190
Напряжение, В	30	30
Наплавка опорной шейки вала		
Сила тока, А	–	190-200

После поверхностной обработки провели триботехнические испытания. Интенсивность изнашивания наплавленного материала исследовали массовым методом путем взвешивая образцов через определенный промежуток времени (6 мин.) в момент испытаний на машине трения. Результаты измерений представлены в виде графиков (рис. 2.2–2.6).

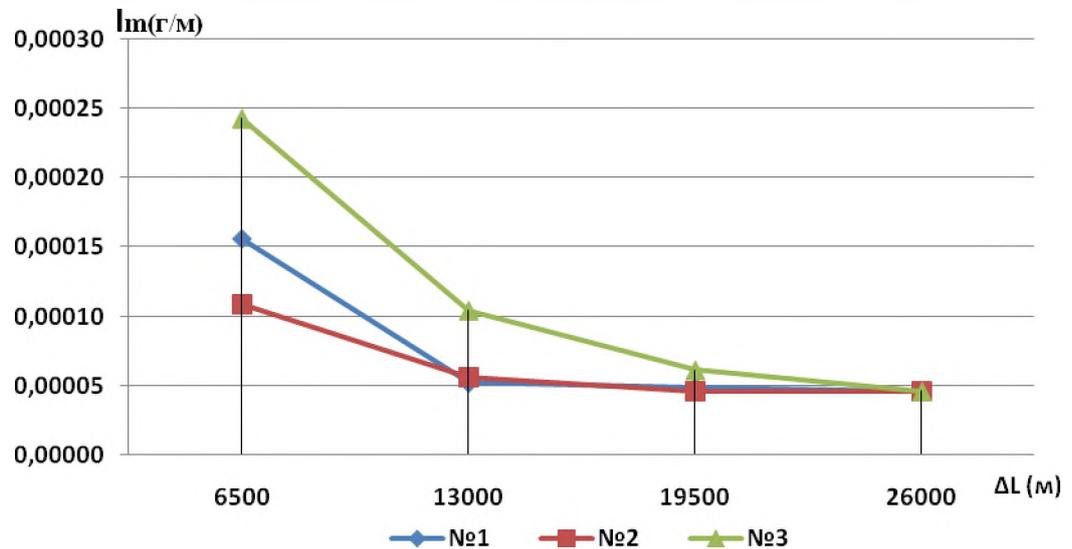


Рисунок 2.2 – Зависимость интенсивности изнашивания I_m для Стали 45 от пути трения L

По графику можно видеть, что основной массовый износ наблюдается в первый промежуток испытания, что связано с приработкой образцов.

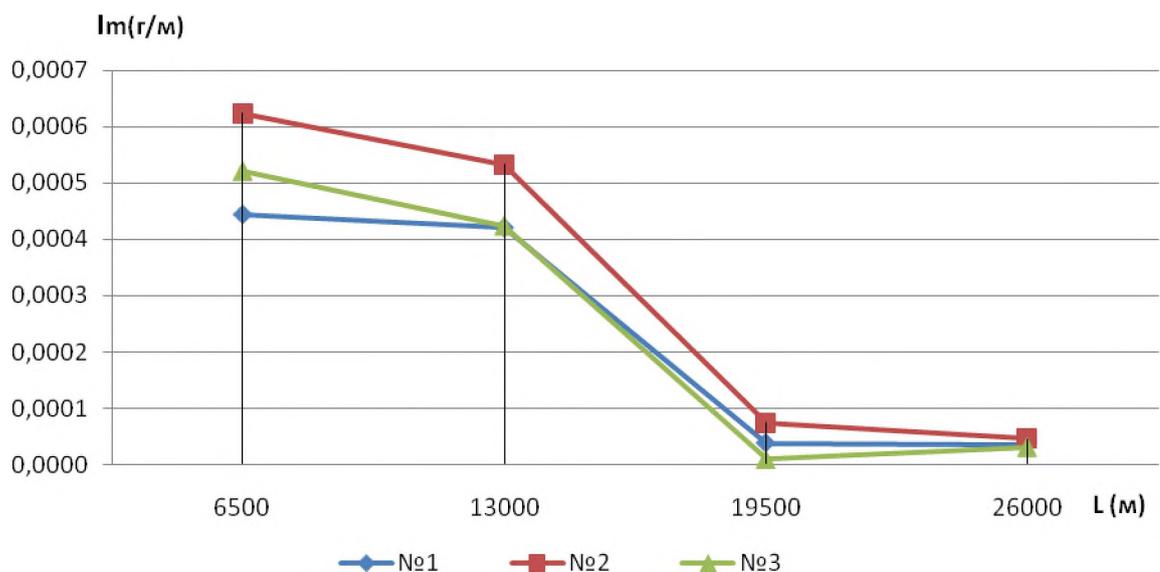


Рисунок 2.3 – Зависимость интенсивности изнашивания I_m для покрытия из порошка ПГ-19М-01 от пути трения L

Наблюдается более сильная и продолжительная потеря массы в момент приработки образцов, предположительно причиной стало недостаточное время шлифовки образцов после наплавки, однако как видно на графике после приработки показания износостойкости наплавленного слоя сравнимы со сталью 45 и даже незначительно превосходят.

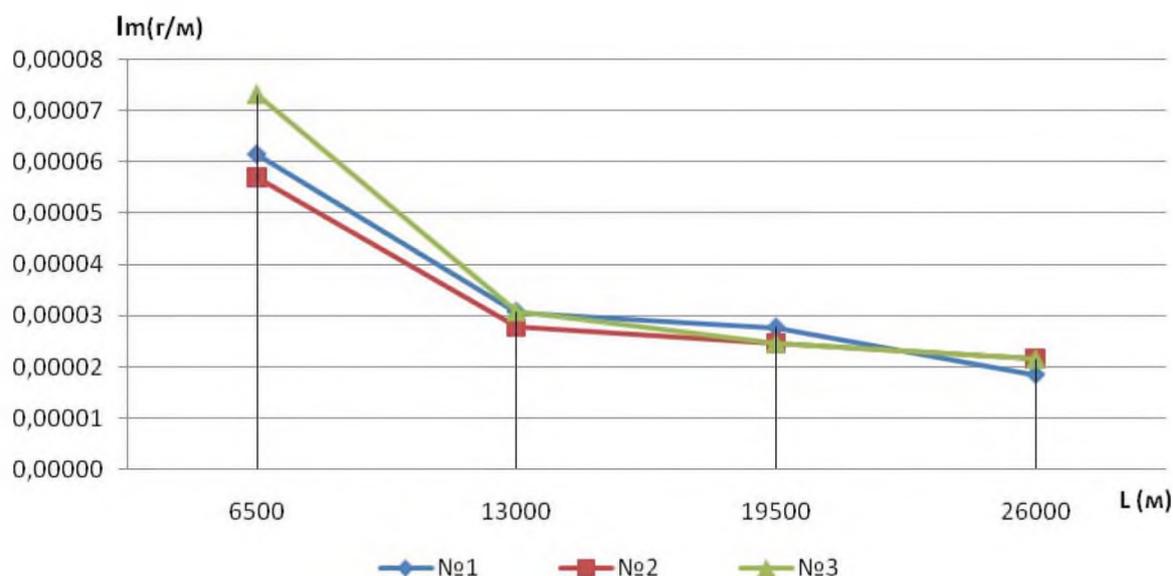


Рисунок 2.4 – Зависимость интенсивности изнашивания I_m для покрытия из ИЧХ от пути трения L

Образцы, наплавленные износостойким хромистым чугуном, имеют минимальные массовые изменения на всех этапах трения, относительно других образцов (рисунок 2.6).

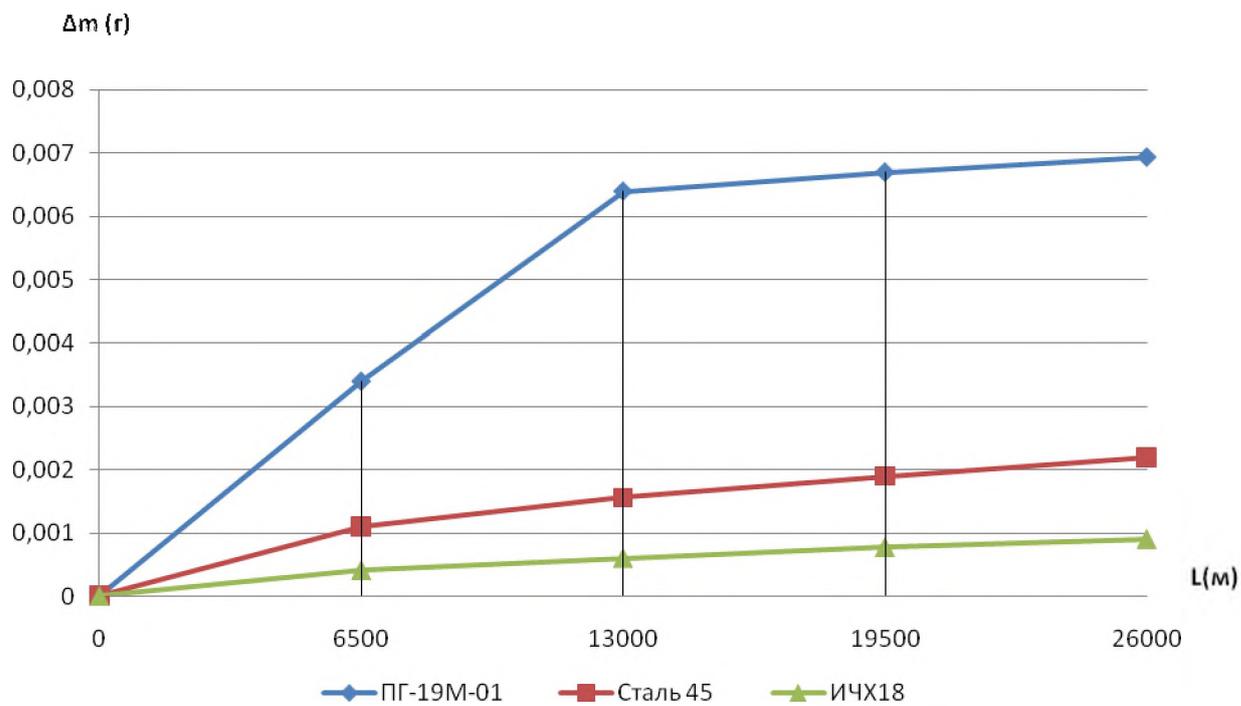


Рисунок 2.5 – Зависимость массового износа Δm от пути трения

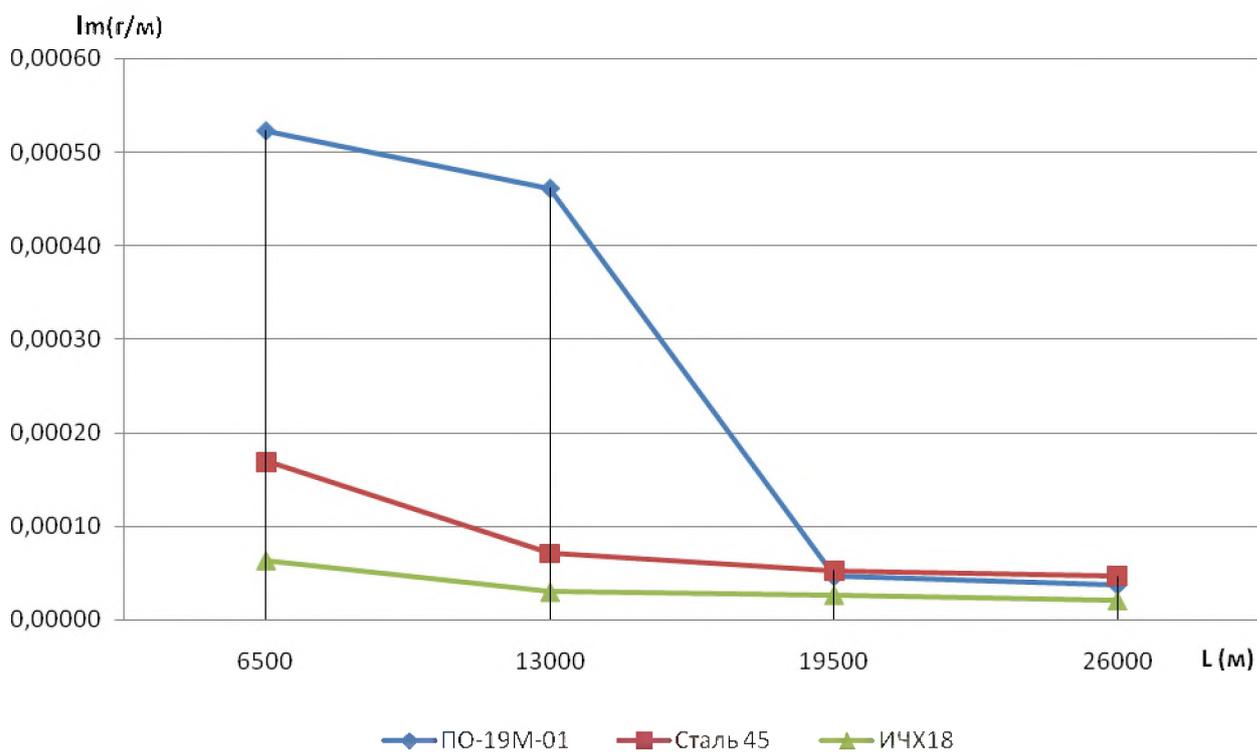


Рисунок 2.6 – Зависимость интенсивности изнашивания I_m от пути трения L

Для понимания происходящих процессов провели анализ микроструктуры образцов. Микроструктура покрытия, полученного наплавкой порошком ПГ-19М-01 представлена на рисунке 2.7.

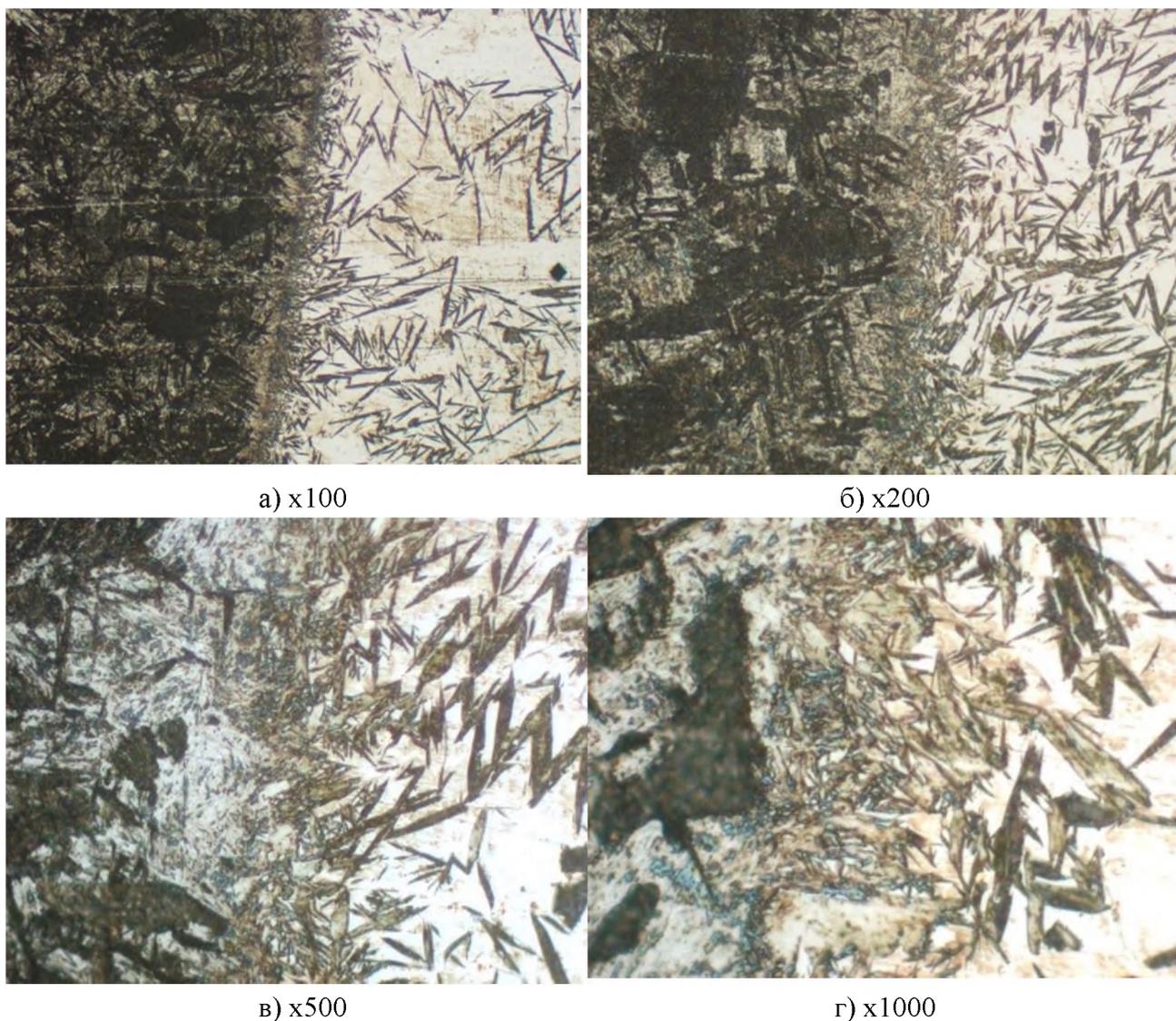
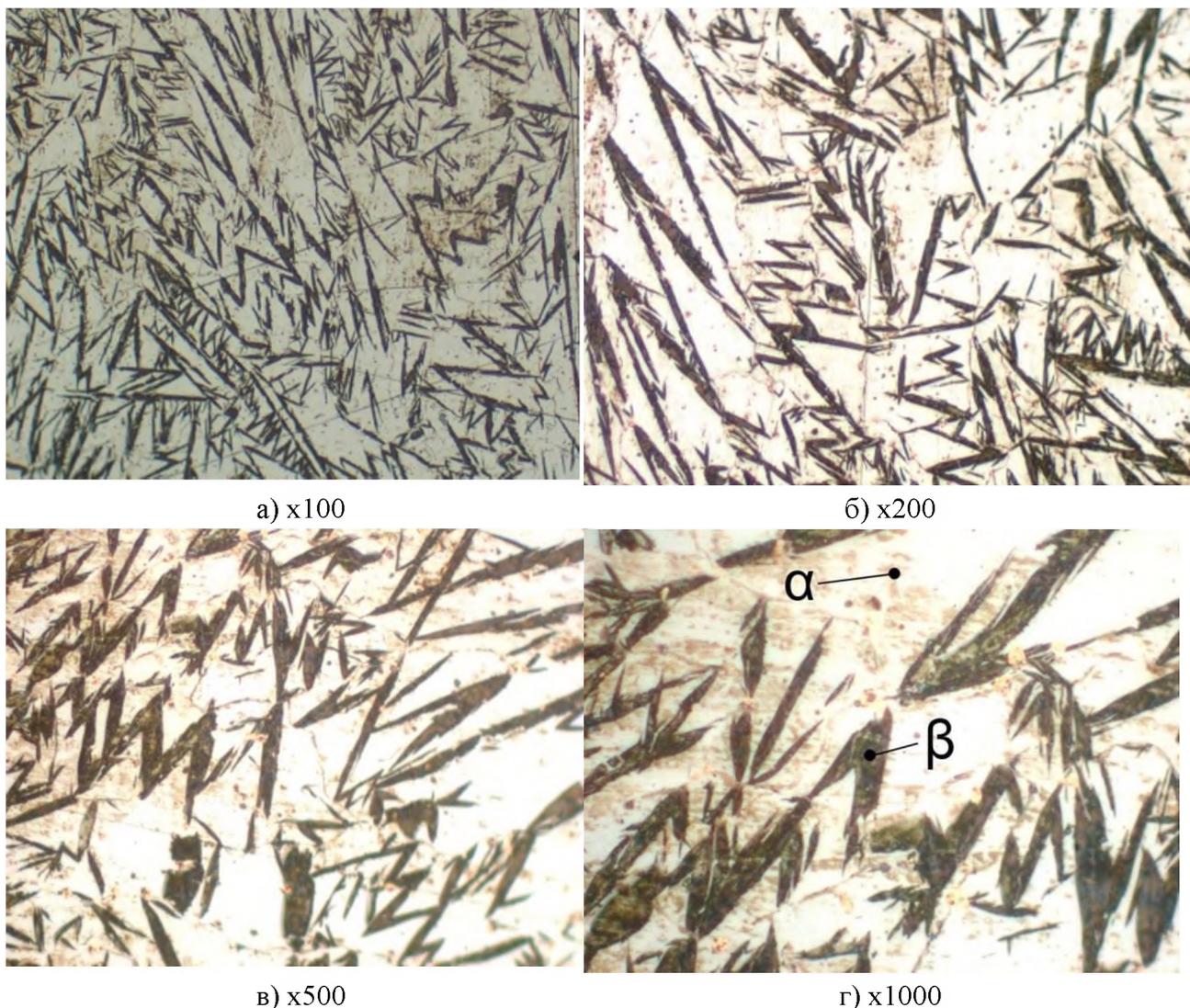


Рисунок 2.7 – Микроструктура покрытия, полученного наплавкой порошком ПГ-19М-01

В системе Cu-Al-Fe, согласно исследованиям сплавов цветных металлов, обнаружены 2 фазы: перенасыщенный α – твёрдый раствор Al и Fe в Cu (480HV); β – упорядоченный твёрдый раствор на основе соединения Cu_3Al (упрочняющая фаза)(680HV) (рис. 2.8 г).



**Рисунок 2.8 – Микроструктура покрытия, полученного
наплавкой порошком ПГ-19М-01**

α – твёрдый раствор Al и Fe в Cu,
 β – упорядоченный твёрдый раствор на основе соединения Cu_3Al

Для более детального анализа были проведены измерения твердости по глубине наплавленного слоя (рис. 2.9), по результатам которых, можно выделить три зоны: основа (наплавленный металл), переходный слой и покрытие.

В переходной зоне наблюдается значительное увеличение микротвердости (1200HV) в два раза превышающее среднее показатели на поверхности наплавленного слоя, вероятно это связано с тем, что в наплавленном порошке содержание железа всего 4%, а в основе его количество достигает 100% ввиду чего происходит диффузия железа в менее насыщенную зону (наплавленный слой).



Рисунок 2.9 – Распределение микротвердости по наплавленному слою порошком ПГ-19М-01



Рисунок 2.10 – Проведение анализа микротвердости

Покрытие из порошка ПГ19М-01 по своим прочностным свойствам практически не уступает поверхности стали. По антифрикционным свойствам показатели выше. Температура плавления порошка приблизительно в 1,7–2 раза ниже, чем у стали, что в свою очередь позволяет минимизировать внутренние напряжения, возникающие при наплавке.

Отрицательные эффекты от применения данного порошка: разные теплофизические свойства со сталью, бронза с железом образуют гальванопару и при нарушении сплошности покрытия сталь интенсивно разрушается.

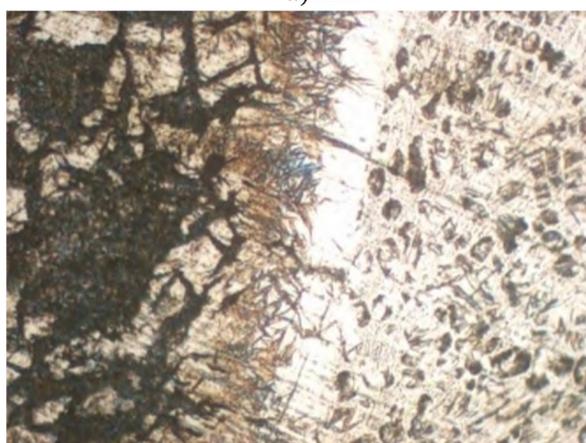
Аналогичным способом был проведен анализ микроструктуры покрытия полученного наплавкой высокохромистого износостойкого чугуна (рис. 2.11.)



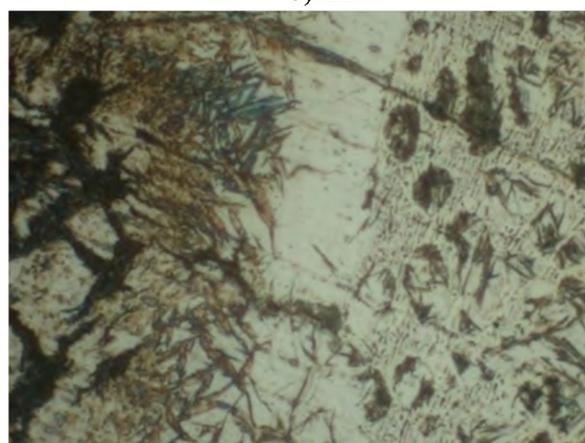
а) x100



б) x200



в) x500



г) x1000

Рисунок 2.11 – Переходная зона наплавки порошком ИЧХ18

Структура имеет ярко выраженное дендритное строение, скорее всего заэвтектического типа с микротвердостью 560 НV. В карбидной матрице (карбиды хрома, карбиды железа (светлая часть) расположена эвтектика (легированный хромом мартенсит (высокая закаливаемость достаточно 13% хрома, чтобы сталь стала **самокалом**, (у нас $\approx 28\%$) + карбиды) дендритные включения, т.к. много хрома.

Микротвердость покрытия из износостойкого чугуна на поверхности на 10% выше, чем микротвердость основы (рис. 2.13). Низкий коэффициент трения обеспечивается высокой твердостью (низкой шероховатостью,

отсутствием пор и задигов). В процессе трения сохранялась повышенная задиристость из-за отсутствия средства поверхностей.

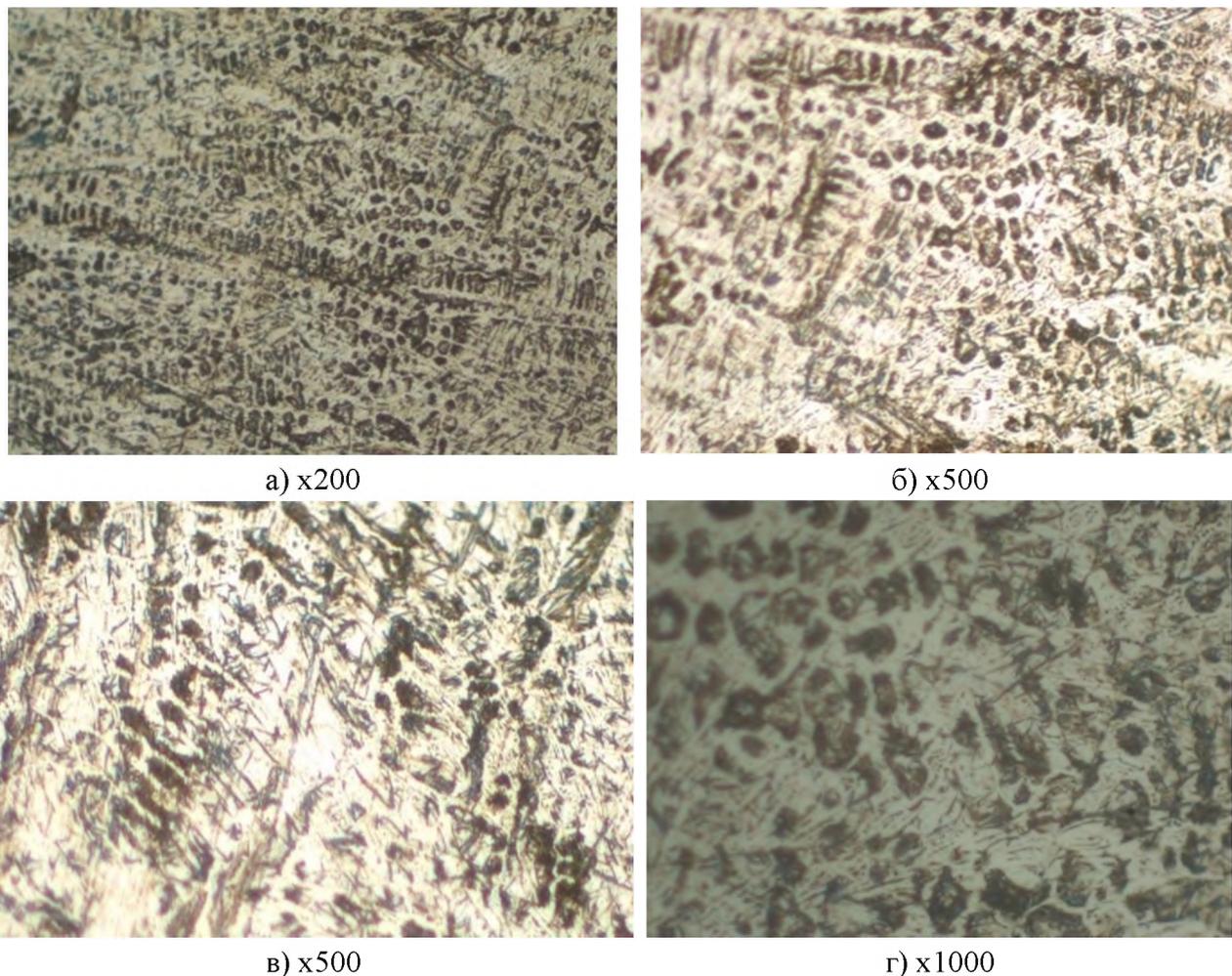


Рисунок 2.12 – Микроструктура наплавленного порошком ИЧХ18 покрытия



Рисунок 2.13 – Распределение микротвердости по наплавленному слою порошком ИЧХ18



Рисунок 2.14 – Проведение анализа микротвердости

Таким образом, анализ микроструктур и микротвердости покрытий, полученных наплавкой с использованием в качестве наплавочного материала порошка ПГ-19М-01 и износостойкого хромистого чугуна позволил обосновать влияние микроструктуры на интенсивность изнашивания и коэффициент трения восстановленных валов. При этом интенсивность изнашивания материала покрытия, восстановленных распределительных валов сопоставима с интенсивностью изнашивания новых или ниже в 1,2 раза. Требуемая интенсивность изнашивания обеспечена микроструктурой материала покрытия после наплавки, представляющей гетерогенную структуру состоящую из карбидной матрицы и эвтектики (наплавка ИЧХ) и перенасыщенный α – твёрдый раствор Al и Fe в Cu; β – упорядоченный твёрдый раствор на основе соединения Cu_3Al (наплавка ПГ-19М-01).

На основании полученных экспериментальных исследований для восстановления стальных распределительных валов рекомендована наплавка шеек износостойким хромистым чугуном, позволяющим получить покрытие с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения.

Выводы.

1. Анализ микроструктур и микротвердости покрытий, полученных наплавкой с использованием в качестве наплавочного материала порошка ПГ-19М-01 и износостойкого хромистого чугуна позволил обосновать влияние микроструктуры на интенсивность изнашивания и коэффициент трения восстановленных валов.

2. Интенсивность изнашивания материала покрытия, восстановленных распределительных валов сопоставима с интенсивностью изнашивания новых или ниже в 1,2 раза. Требуемая интенсивность изнашивания обеспечена

микроструктурой материала покрытия после наплавки, представляющей гетерогенную структуру состоящую из карбидной матрицы и эвтектики (наплавка ИЧХ) и перенасыщенный α – твёрдый раствор Al и Fe в Cu; β – упорядоченный твёрдый раствор на основе соединения Cu_3Al (наплавка ПГ-19М-01).

3. На основании полученных экспериментальных исследований для восстановления стальных распределительных валов рекомендована газопорошковая наплавка кулачков порошком ПГ-19М-01 и дуговая наплавка шеек износостойким хромистым чугуном ИЧХ18, позволяющим получить покрытие с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения.

Раздел 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ

Распределение механических потерь по механизмам, узлам и агрегатам двигателей внутреннего сгорания (ДВС) представлено на рисунке 3.1, из которого следует явное превалирование потерь на трение в ЦПГ над остальными составляющими [6–8]. Отсюда вытекает вывод о существовании значительного резерва энергосбережения за счет снижения потерь на трение в соединениях ЦПГ.

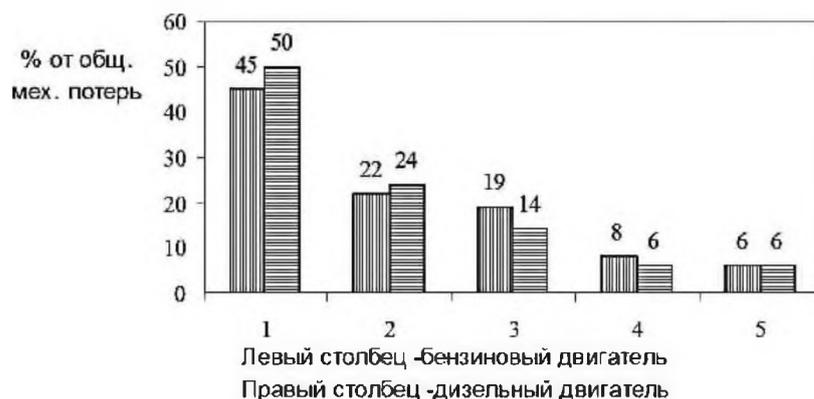


Рисунок 3.1. Распределение составляющих механических потерь по узлам и агрегатам ДВС: 1 – ЦПГ; 2 – КШМ; 3 – газообмен; 4 – ГРМ; 5 – навесные агрегаты.

Исходя из гидродинамической теории смазки, принципа согласования (равенства) работ гидродинамической и динамической сил и профилирования клиновых подшипников можно получить рациональные значения перепадов высот профиля и соотношений длин его участков (рисунок 3.2).

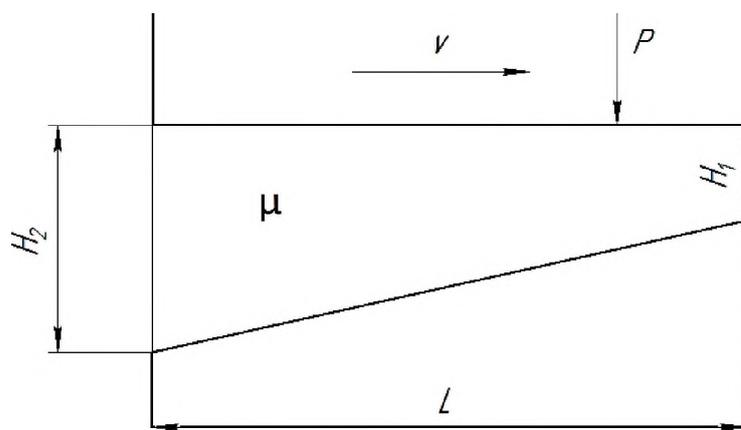


Рисунок 3.2. Характерные размеры несущего профиля.

Из решения известного уравнения Рейнольдса для плоского потока жидкости, определяющее изменение давления в нем при бесконечно большой ширине потока в направлении, перпендикулярном направлению скорости v движения пластины можно получить выражение для подъемной силы или реакции смазочного материала в зазоре смазываемых деталей сопряжений ЦПГ[39].

$$P = 6 \cdot \mu \cdot v \frac{L^2}{H_1^2} \cdot \frac{1}{\delta^2} \cdot \left[\ln(1 + \delta) - 2 \cdot \frac{\delta}{2 + \delta} \right]; \quad (3.1)$$

или

$$P = 6 \cdot \mu \cdot v \frac{L^2}{H_1^2} \cdot P_\delta; \quad (3.2)$$

здесь

$$P_\delta = \frac{1}{\delta^2} \cdot \left[\ln(1 + \delta) - 2 \cdot \frac{\delta}{2 + \delta} \right]; \quad (3.3)$$

$$\delta = \frac{H_2 - H_1}{H_1}; \quad (3.4)$$

Уравнение (3.3) является функцией Релея, которая зависит только от параметра (3.4), который является относительным перепадом высот профиля.

Разложение слагаемого $\ln(1+\delta)$ в ряд (что вполне допустимо при $0 < \delta < 1$) показывает, что в области малых значений относительного перепада высот профиля $0 < \delta < 0,1$ функция Релея (3) после очевидных преобразований с погрешностью не более 10% может быть представлена упрощенной, линейной формой:

$$P_\delta = \frac{\delta}{12}; \quad (3.5)$$

В случае использования упрощенной формулы (3.5) для функции Релея выражение гидродинамической несущей способности профиля можно представить как:

$$P = 6 \cdot \mu \cdot v \cdot \frac{L^2}{H_1^2} \cdot \frac{\delta}{12}; \quad (3.6)$$

или, с учетом (3.6, 3.5):

$$P = \mu \cdot v \cdot \frac{L^2 (H_2 - H_1)}{2 \cdot H_1^3}; \quad (3.7)$$

В формуле (3.7), такие параметры как μ (коэффициент вязкости, Па·с) и v (скорость движения поршня, м/с) известны из условия работы двигателя и зависят только от его характеристик. Реакция смазочного материала P (Н)

равна силе давления поршня на стенку гильзы цилиндра. Таким образом, лишь входная H_1 (мм) и выходная H_2 (мм) ширина зазора на шаге L (мм) характеризуют профиль регулярных выступов микрорельефа, именно их сочетание и численные значения и определяют профилирование. Поэтому расчетная схема при отсутствии микрорельефа на кольце и юбки поршня является достаточно простой и может быть представлена в виде горизонтальной плоскости (поршень), движущейся на слое жидкости вдоль наклонной плоскости (цилиндр) (см. рисунок 3.7.). Таким образом, получаем соединение «поршень–цилиндр» с пилообразным микрорельефом. При этом высота выступа H_{tmax} (мм) должна обеспечивать необходимый угол подъема наклонной плоскости для создания гидродинамического клина, поддерживающего жидкостное трение на всем пути движения поршня. Также необходимо учесть реверсивный характер движения поршня относительно внутренней поверхности гильзы, т.е. поршень при перемещении действует на гильзу с боковой силой и в конце каждого хода, переключаясь с ударом о стенку гильзы, меняет направление своего движения. Поэтому выступ микрорельефа должен иметь две сопряженные наклонные плоскости (рисунок 3.3.).

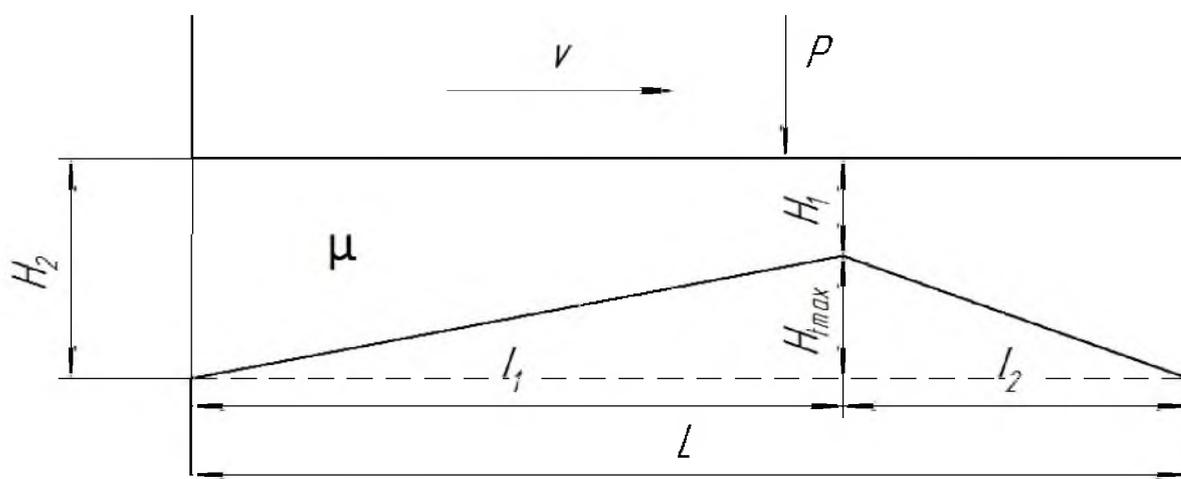


Рисунок 3.3. Расчетная схема для микропрофилирования внутренней поверхности гильзы цилиндра.

Согласно расчетной схеме, для того, чтобы назначить рациональные шаго-высотные параметры микрорельефа, которые смогут обеспечить минимальную, но достаточную ширину зазора H_1 для обеспечения жидкостного трения, необходимо определить высоту выступа H_t , длину выступа L и длины наклонных плоскостей на прямом и обратном ходах

поршня l_1 (мм) и l_2 (мм) для каждой зоны рабочей поверхности гильзы исходя из условий работы (см. рисунок 3.3.).

Для получения решений в максимально обобщенном, аналитическом виде были приняты следующие упрощающие допущения:

1. Задача рассматривается в плоской (продольное, осевое сечение), стационарной постановке для бесконечной ширины поверхностей.

2. Обращенные друг к другу поверхности поршневого кольца, поршня и цилиндра (микрорельефа) составлены из сопряженных участков гладких, плоских, недеформируемых (абсолютно твердых) геометрических тел.

3. Пространство между сопряженными поверхностями заполнено вязкой несжимаемой (ньютоновской) жидкостью с динамической вязкостью μ .

4. Одно из сопряженных тел (применим принцип обратимости движения) движется относительно другого в осевом направлении с постоянной скоростью v .

5. Микрорельеф нанесен только на зеркале цилиндра и составлен из регулярно чередующихся фрагментов (выступов).

6. Избыточное гидродинамическое давление на кромках поршневого кольца отсутствует (нулевые граничные условия по давлению).

Тогда по расчетной схеме длина выступа микрорельефа L , которая бы обеспечивала гидродинамический клин при реверсивном движении и необходимую маслосъемкость поверхности:

$$L = l_1 + l_2; \quad (3.8)$$

где l_1 – длина выступа на прямом ходу (от ВМТ к НМТ), l_2 – длина выступа на обратном ходу (от НМТ к ВМТ).

Если бы работа сил внешнего нагружения и трения была равномерно распределена по тактам рабочего цикла, то наилучшим соотношением длин с точки зрения максимизации несущей способности следовало бы признать:

$$\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 = \frac{l_1}{l_2} = 1; \quad (3.9)$$

Однако распределение сил отличается существенной тактовой неравномерностью. Например, в работах [40–43] дано следующее распределение механических потерь, связанное с работой силы трения в ЦПГ по тактам рабочего цикла условно обобщенного четырехтактного ДВС: впуск – 20%, сжатие – 26%, расширение – 34%, выпуск – 20%. А в работе [44] проведенный анализ показал, что независимо от размерности, уровня форсирования, типа смесеобразования и даже режима работы различных

четырёхтактных двигателей, распределение работ сил внешней нагрузки их ЦПГ отличается неравномерностью по тактам рабочего цикла в соотношении: впуск – 5%, сжатие – 13%, расширение – 75%, выпуск – 7%. Из сравнения этих данных следует, что неравномерность распределения работы силы трения в течение рабочего цикла заметно меньше неравномерности распределения по тактам работы сил внешней нагрузки, что объясняется отсутствием прямой зависимости между внешней нагрузкой и силой трения при жидкостном трении, характерном для деталей ЦПГ ДВС. Общее распределения механических потерь будет иметь следующий вид: впуск – 8%, сжатие – 17%, расширение – 66%, выпуск – 9%.

Если рассмотреть рабочий цикл четырёхтактного ДВС, то при тактах «впуск» и «рабочий ход» (1-ый и 3-ий такты) поршень от верхней мертвой точки перемещается к нижней мертвой точке, а при тактах «сжатие» и «выпуск» (2-ой и 4-ый такты) поршень двигается в обратном направлении.

В течение наиболее энергоёмких тактов – сжатие и расширение – соотношение работ составляет 17% к 66% соответственно. Используя принцип согласования несущей способности с характером обобщенного силового воздействия, целесообразно соотношение длин l_1 и l_2 согласовать с данным соотношением работ всех сил по правилу: большей работе должна соответствовать большая длина участка несущего профиля, т.е.

$$\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 = \frac{66}{17}; \quad (3.10)$$

или, переходя к отношению длин,

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{66}{17}} = 1,97; \quad (3.11)$$

Данное соотношение (3.11) может быть рекомендовано для назначения рациональных длин участков выступа микрорельефа при прямом и обратном ходах поршня применительно к внутренней поверхности гильзы четырёхтактного ДВС. Общая длина выступа микрорельефа может быть выражена из уравнения (3.6):

$$L = H_1 \cdot \sqrt{\frac{2P}{\mu \cdot v \cdot \delta}}; \quad (3.12)$$

Из выражения (3.12) следует, что с увеличением толщины масляной пленки H_1 и гидродинамической несущей способности P длина выступа микрорельефа L будет увеличиваться.

Толщина масляной пленки H_1 (входная ширина зазора) должна быть минимальная, но достаточная на всем пути движения поршня для создания режима жидкостного трения при выбранных шаго-высотных параметрах микрорельефа. Для определения ширины входного зазора H_1 было проанализировано большое количества зависимостей на основе расчета силы трения. Наиболее полно и достоверно этот процесс описывает формула, которая предложена известными трибологами Ф. Боуденом и Д. Тейбором [44–51]:

$$F = \alpha \cdot F_b + (1 - \alpha) \cdot F_h; \quad (3.13)$$

где F_b —сила граничного трения (Н), определяемая законом Амонтона; α —признак режима трения ($\alpha = 0$, при жидкостном трении); F_h — сила гидродинамического трения (Н), согласно Ньютону.

При этом:

$$F_h = \frac{\mu \cdot v \cdot S}{H_1}; \quad (3.14)$$

где S —площадь смоченной поверхности движущейся детали, мм².

В свою очередь сила трения может быть выражена формулой:

$$F_h = f \cdot P; \quad (3.15)$$

где f —коэффициент трения скольжения (для жидкостного трения $f = 0,003-0,3$).

Площадь смоченной поверхности движущейся детали находим как:

$$S = S_{\text{кол.}} \cdot S_{\text{порш.}}; \quad (3.16)$$

где $S_{\text{кол.}}$ —площадь контакта колец, мм²; $S_{\text{порш.}}$ —площадь контакта поршня, мм².

Преобразуем уравнение (3.14) с учетом соотношений (3.15) и (3.16), выразив при этом входную ширину зазора H_1 :

$$H_1 = \frac{\mu \cdot v \cdot S_{\text{кол.}} \cdot S_{\text{порш.}}}{f \cdot P}; \quad (3.17)$$

Зависимость толщины масляной пленки H_1 от ГНС P наглядно представлена в работе [52-54] (рисунок 3.5):

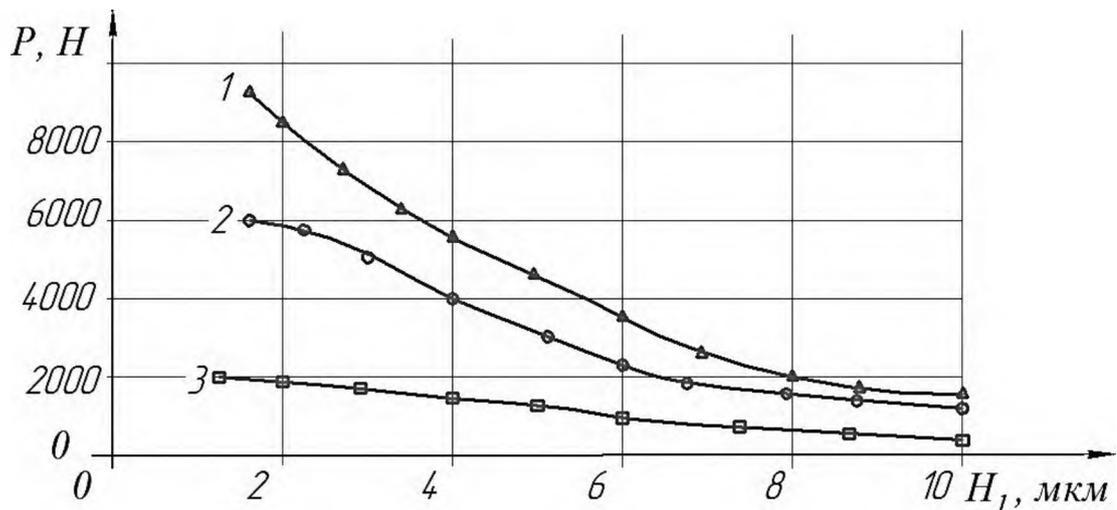


Рисунок 3.4. Зависимость ГНС, действующей со стороны масляной пленки от минимальной толщины масляного слоя: 1 – $v = 12$ м/с, 2 – $v = 8$ м/с, 3 – $v = 2$ м/с.

В таком случае для каждого из множества толщин слоя смазки H_1 будет существовать определенное значение несущей способности P . Для того, чтобы толщина слоя смазки имела минимальное, но достаточное значение, при котором несущая способность не уменьшалась и значительно не увеличивалась, необходимо задаться постоянным значением высоты выступа микрорельефа H_t (мм) по всей длине внутренней поверхности гильзы. Для решения задачи, построим и проанализируем график изменения функции Релея (3.3).

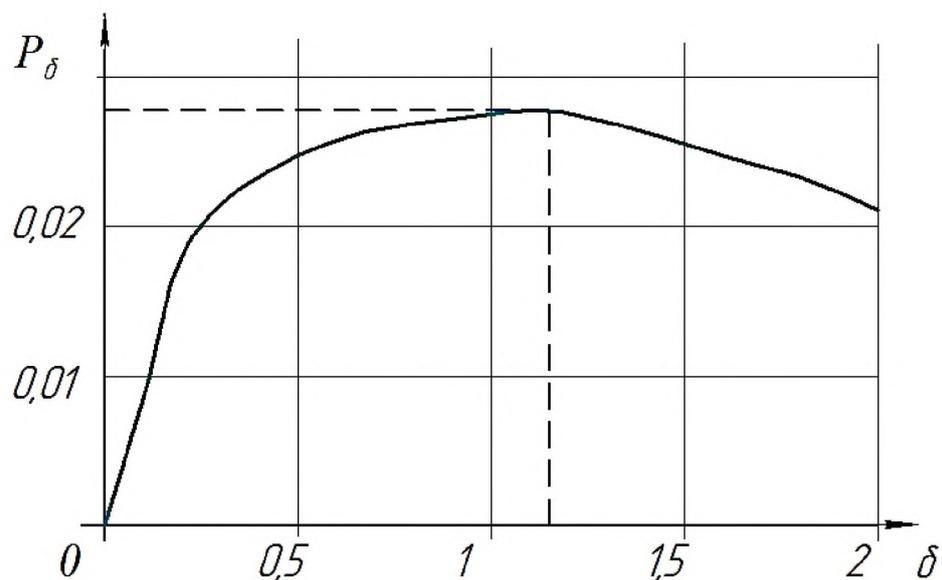


Рисунок 3.5. Графики функции Релея

Как следует из рисунка 3.6, максимум функции Релея достигается при значении относительного перепада $\delta = 1,2$, что совпадает с теоретическими

результатами исследования на максимум полученные в работах [55-56]. Это значит, что существует такая высота выступа H_{tmax} , при которой, функция (2) достигает максимума с дальнейшим увеличением гидродинамической несущей способности. То есть высота выступа H_{tmax} создает необходимый угол подъема наклонных плоскостей для создания гидродинамического клина при реверсивном движении поршня (см. рисунок 3.8). Из выражения (3.4) следует:

$$H_{tmax} = \delta_{max} \cdot H_1; \quad (3.18)$$

Однако постоянное увеличение ГНС приводит, во-первых, к росту расхода масла, его механического выброса, выгорания и испарения, а, во-вторых, к увеличению интенсивности контактирования деталей, вызывающей не снижение, а, наоборот, увеличение трения и изнашивания. К тому же пилообразная форма выступов может служить концентраторами напряжений, а в моменты уменьшения скорости движения (вплоть до нуля), они могут быть источниками повышенного износа и возникновения задиров на поверхности поршня и поршневых колец. Поэтому первое приближение к реально существующей форме выступов микрорельефа – наклонные плоскости, сопряженные с плоским участком (рисунок 3.7.).

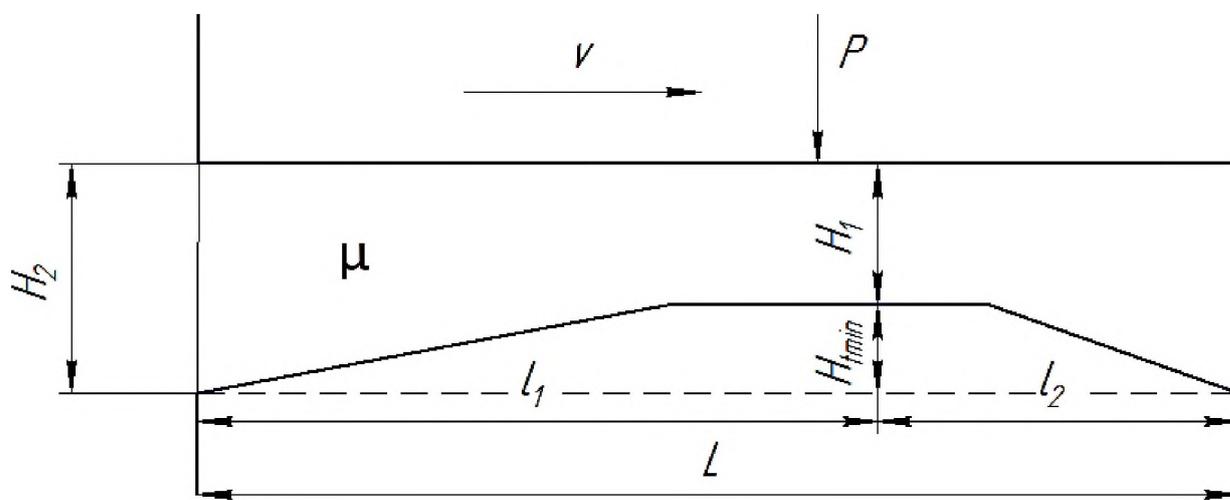


Рисунок 3.6. Профиль выступа микрорельефа

Физический смысл наличия горизонтального удлинения в том, что этот участок призван воспринимать внешнюю нагрузку в моменты уменьшения (вплоть до нуля) скорости движения и поддерживать постоянный гидродинамический клин на всем пути движения поршня с углами подъема наклонных плоскостей соответствующих высоте выступа H_{tmax} .

Из выше сказанного следует, что существует такое значение относительного перепада высот δ_{min} , при котором параметр H_t должен принимать минимальное, но достаточное значение H_{tmin} (мм) для создания жидкостного трения и обеспечения необходимой маслосъемности поверхности, предполагая минимальную толщину масляной пленки H_1 т.е.

$$H_{tmin} = \delta_{min} \cdot H_1; \quad (3.19)$$

Тогда существует некоторый абсолютный перепад высот Δ :

$$\Delta = H_{tmax} - H_{tmin}; \quad (3.20)$$

В свою очередь абсолютный перепад высот Δ показывает во сколько раз можно уменьшить высоту выступа H_t или значение относительного перепада высот, при этом, не уменьшив максимального значения ГНС и не изменив углы подъема наклонных плоскостей:

$$\Delta = \frac{H_{tmin}}{H_{tmax}} = \frac{\delta_{min}}{\delta_{max}}; \quad (3.21)$$

И с учетом выражений (18), (19) и (21) найдем H_{tmin} :

$$\frac{H_{tmin}}{\delta_{max} \cdot H_1} = \delta_{max} \cdot H_1 - H_{tmin}; \quad (3.22)$$

Что касается произведения $\mu \cdot v$ в выражениях (3.12) и (3.17), то оно отражает жесткость гидродинамического режима работы поршня, оказывает влияние на выбор длины L и толщину масляного слоя H_1 по следующим правилам:

Правило 1. Чем больше толщина масляного слоя, тем меньшее влияние оказывает значение произведения $\mu \cdot v$ на гидродинамическую несущую способность (рисунок 3.8).

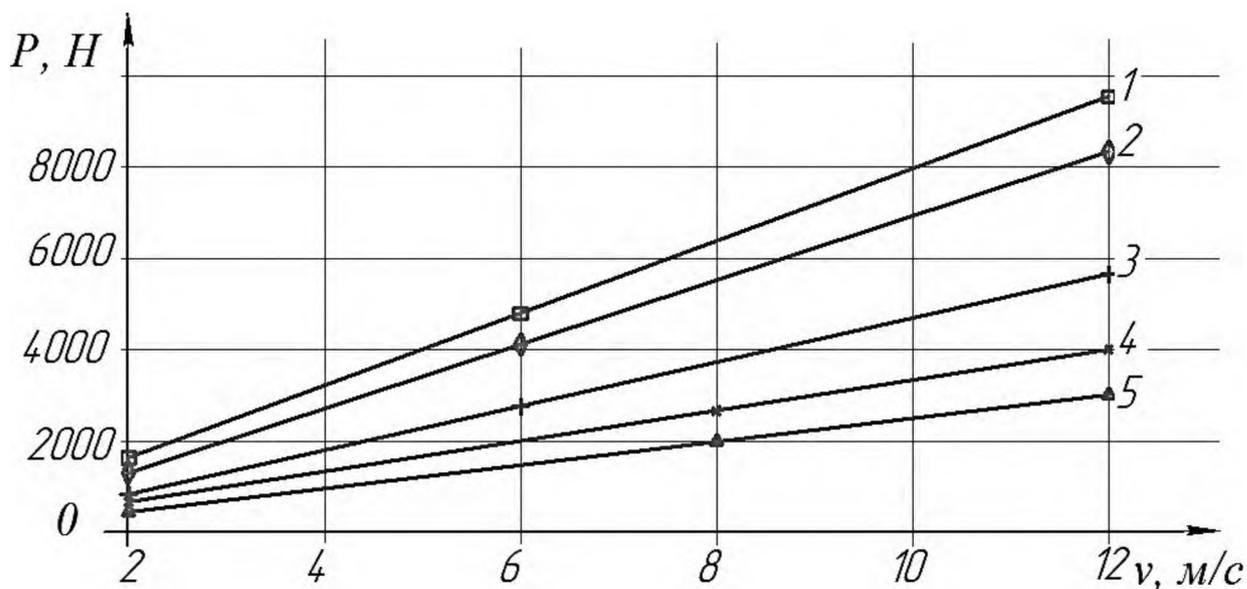


Рисунок 3.7. Зависимость ГНС, действующей на юбку поршня со стороны масляной пленки от скорости поршня v , где 1 – $H_1=1,6$ мкм; 2 – $H_1=2,6$ мкм; 3 – $H_1=4$ мкм; 4 – $H_1=4,8$ мкм; 5 – $H_1=5,4$ мкм

Правило 2. Чем больше значение произведения $\mu \cdot v$, тем меньшая длина выступа микрорельефа L требуется для сохранения минимально допустимого уровня гидродинамической несущей способности.

Для реверсивного характера движения правило 2 означает, что с увеличением вязкости смазочного материала или скорости осевого движения поршня (частоты вращения коленчатого вала) в m раз, достигнутый уровень несущей способности не снизится, если длины несущих участков l_1 и l_2 (или общая длина L) выступа будут уменьшены в $\sqrt{m_i}$ раз. Коэффициент m_i – коэффициент изменения средней скорости $v_{ср}$ и вязкости μ на характерных участках пути движения поршня. То есть при увеличении вязкости моторного масла и (или) скоростного режима целесообразно переходить на более короткие длины несущих участков. При этом значение средней скорости движения поршня $v_{ср}$ является дополнительной справочной информацией для каждого двигателя в отдельности, однако, в литературных источниках [57–58] можно найти усредненные значения скоростей для каждой категории транспортных средств. Так, средняя скорость движения поршня в цилиндре для тракторных и комбайновых двигателей достигает 8–10 м/с; автомобильных 12–17 м/с; гоночных вариантов автомобильных и мотоциклетных – свыше 18 м/с.

В зависимости от особенности изменения скорости движения поршня на любом такте рабочего цикла, график, представленный на рисунке 3.1 можно разделить на четыре характерные зоны (рисунок 3.9):

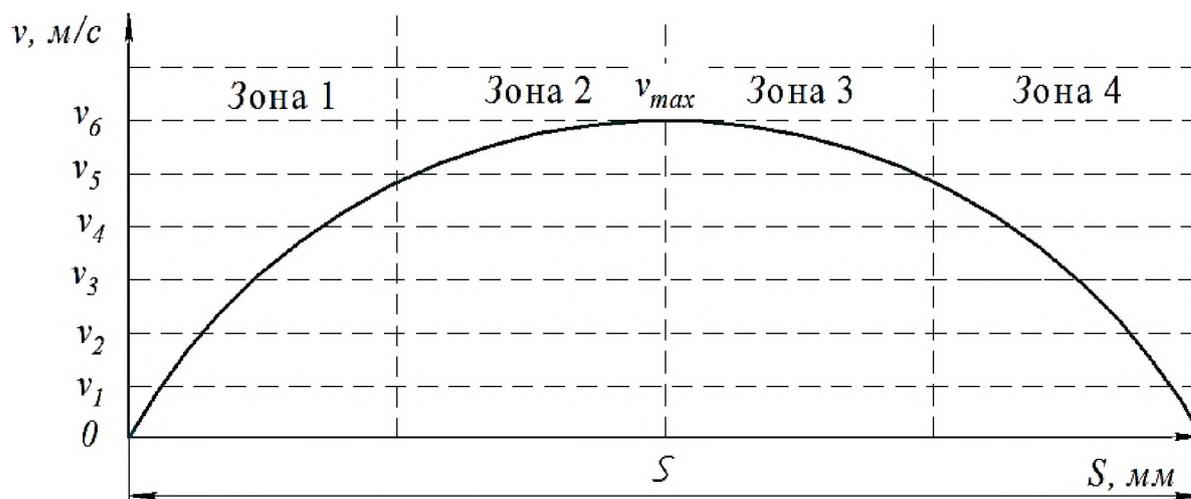


Рисунок 3.8. Изменение скорости при движении поршня

Зона 1 характеризуется быстрым нарастанием скорости от нуля до значения v_5 , следовательно, средняя скорость на этом участке может быть найдена из выражения:

$$v_{ср1} = m_1 \cdot v_{ср}; \quad (3.23)$$

Для зоны 2 характерно относительно медленное увеличение скорости от значения v_5 до v_{max} , поэтому:

$$v_{ср2} = m_2 \cdot v_{ср}; \quad (3.24)$$

Для зон 3 и 4, которые характеризуются участками быстрого и относительно медленного уменьшения скорости соответственно, выражения имеют следующий вид:

$$v_{ср3} = m_3 \cdot v_{ср}; \quad (3.25)$$

$$v_{ср4} = m_4 \cdot v_{ср}; \quad (3.26)$$

С учетом полученных соотношений (3.23) – (3.26) график, изображенный на рисунке 3.12, примет вид (рисунок 3.10):

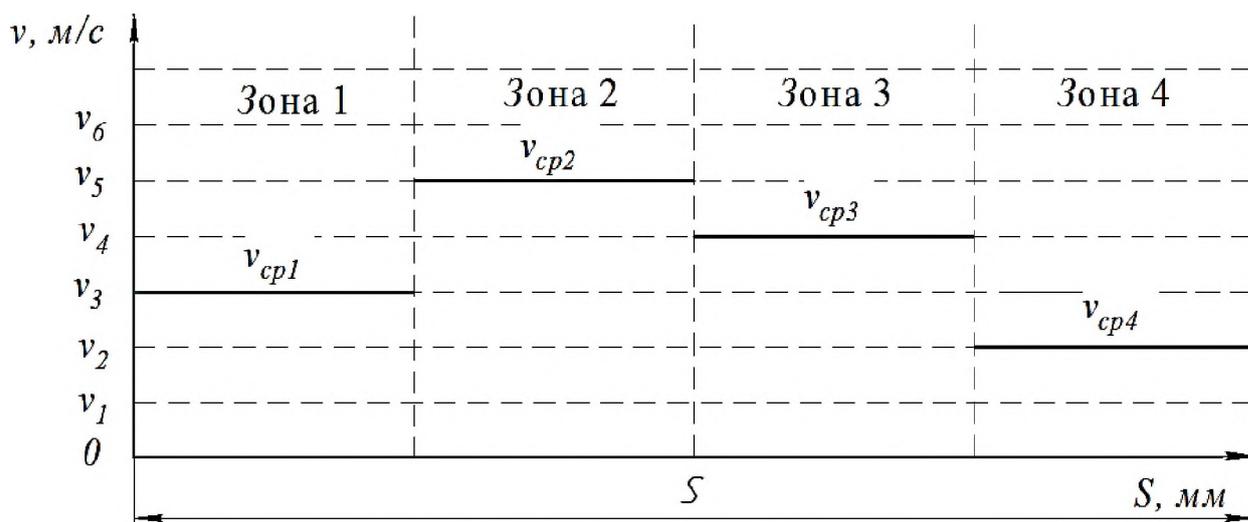


Рисунок 3.9. Характерные средние скорости для каждой зоны

Согласно правилам 1 и 2 распределение длины L выступов микрорельефа по внутренней поверхности гильзы в плоскости параллельной движению поршня будет иметь зональный характер.

Таким образом, решение системы из 5-ти уравнений (3.8), (3.11), (3.12), (3.17), (3.22) позволит определить основные соотношения шаго-высотных параметров микрорельефа, которые обеспечивают создание режима жидкостного трения в сопряжениях ЦПГ с минимальной, но достаточной маслоспособностью поверхности.

Такие теоретические исследования были апробированы на практике.

В ходе триботехнических исследований, проведенных на лабораторном стенде возвратно-поступательного движения, нами были определены зависимости износов и коэффициента трения от нагрузки.

На рисунке 3.10 приведены график распределения коэффициента трения в зависимости от нагрузки:

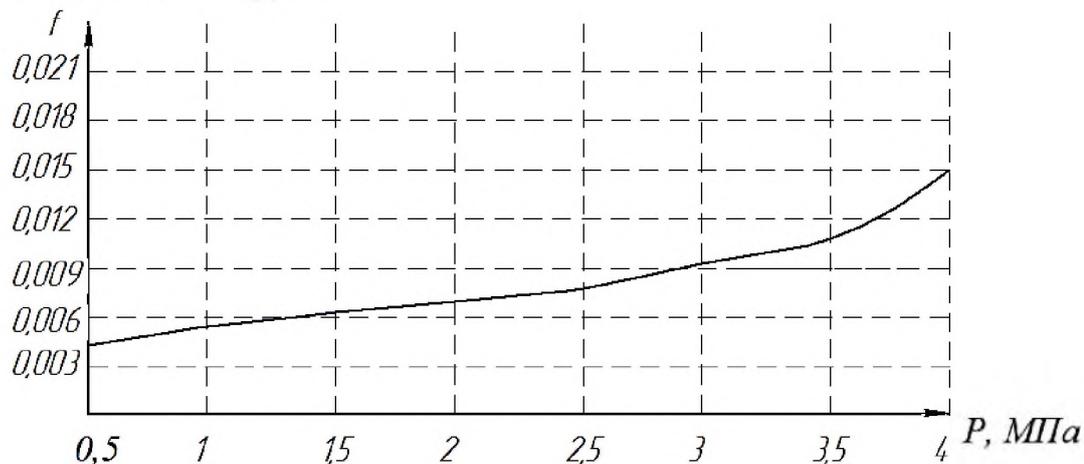


Рисунок 3.10. Зависимость коэффициента трения f от нагрузки P рабочей поверхности образцов с нанесенным микрорельефом. Скорость скольжения индентора $v = 1,7$ м/с.

При этом коэффициент трения в паре трения, где подвижный образец не имел микрорельефа, значительно выше при тех же значения нагрузки, и наблюдается значительный перепад коэффициента трения с увеличением нагрузки (рисунок 3.11):

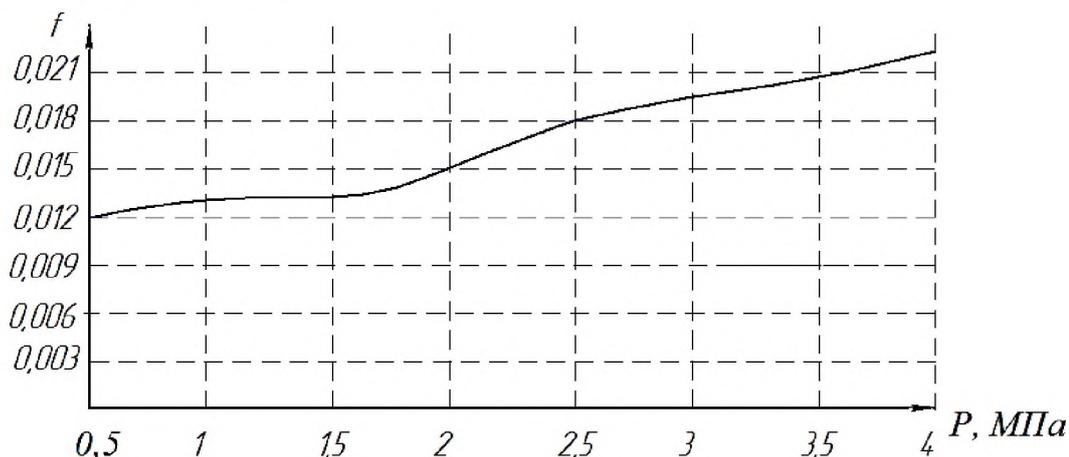


Рисунок 3.11. Зависимость коэффициента трения f от нагрузки P рабочей поверхности образцов без микрорельефа. Скорость скольжения индентора $v = 1,7$ м/с

Однако коэффициент трения поверхности с микрорельефом не соответствовал значению, которое характерно для жидкостного трения (0,001–0,003), при большинстве предложенных нагрузок. Это обусловлено повышенной силой трения $F_{\text{тпо}}$ в контрольной точке ее измерения в зоне реверса, где скорость образца была равной или близкой к нулю ($v = 0$ или $v \approx 0$). Показатели измерений коэффициентов трения в контрольных точках представлены в таблица 3.1.

Таблица 3.1. Значения коэффициентов трения в контрольных точках

P , МПа	f_0	f_{max}	$f_{\text{ср}}$	m
0,5	0,0005	0,01	0,004	3
1,0	0,001	0,012	0,007	2,8
1,5	0,001	0,018	0,008	3,2
2,0	0,002	0,02	0,009	2,6
2,5	0,003	0,023	0,011	3,2

3,0	0,004	0,023	0,012	3
3,5	0,006	0,03	0,014	3,1
4,0	0,006	0,039	0,015	2,8

Если сравнить показатели измерений коэффициентов трения в контрольных точках (см. таблица 3.1), то можно проследить закономерность, что значение коэффициента трения зоны реверса примерно в 3 раза больше значения коэффициента трения в точке середины хода образца:

$$m = \frac{f_0}{f_{max}} \approx 3; \quad (4.35)$$

Поэтому согласно правилу 2 для реверсивного характера движения (см. гл. 3), необходимо увеличить длины несущих участков l_1 и l_2 (или общую длину L) выступа в \sqrt{m} раз. Тогда длины выступов в зоне реверса должны быть увеличены в 1,73 раза. После повторных исследований образцов с измененным микрорельефом согласно правилу коэффициент трения в большинстве случаев соответствовал жидкостному режиму (рисунок 3.12).

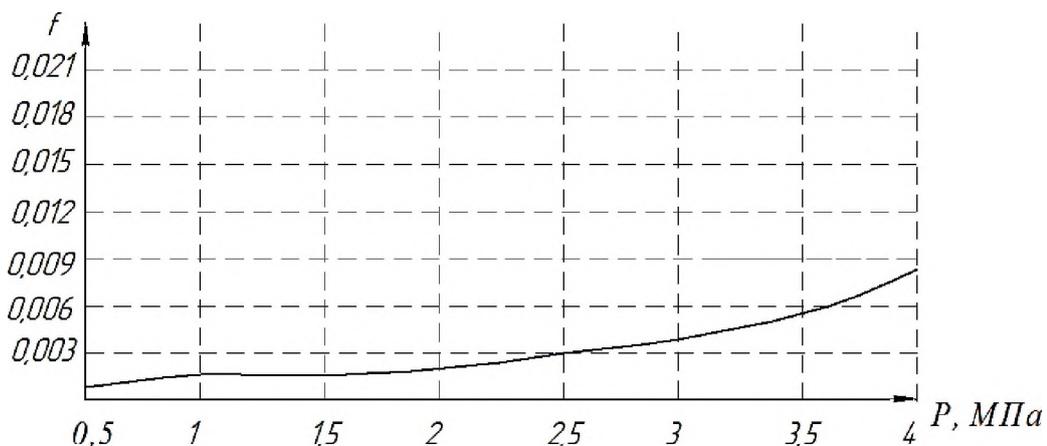


Рисунок 3.12. Зависимость коэффициента трения f от нагрузки P рабочей поверхности образцов с измененным микрорельефом. Скорость скольжения индентора $v = 1,7$ м/с

В таблице 3.2. представлены значения интенсивности абразивного изнашивания образцов из серого чугуна СЧ-40 с нанесенным на рабочую поверхность микрорельефом и без микрорельефа при воздействии различных нагрузок.

Таблица 3.2. Интенсивность абразивного изнашивания образцов из серого чугуна СЧ-40.

P , МПа	I_{0M} , Г/М	I_0 , Г/М
0,5	0,3	4,4
1	0,5	6,1
1,5	0,9	9,0
2	1,8	14,4
2,5	2,8	18,2
3	4,1	22,3
3,5	5,5	23,8

В виде графиков зависимости интенсивности изнашивания I_{0M} и I_0 от нагрузки P можно представить (рисунок 3.13 а, б):

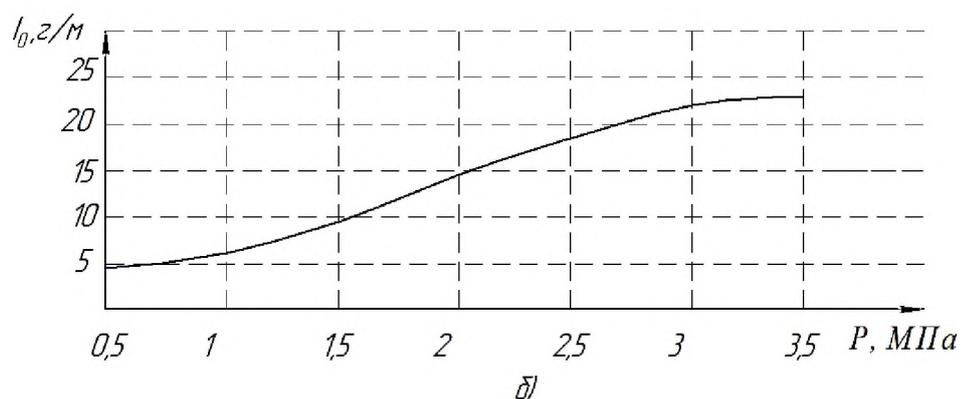
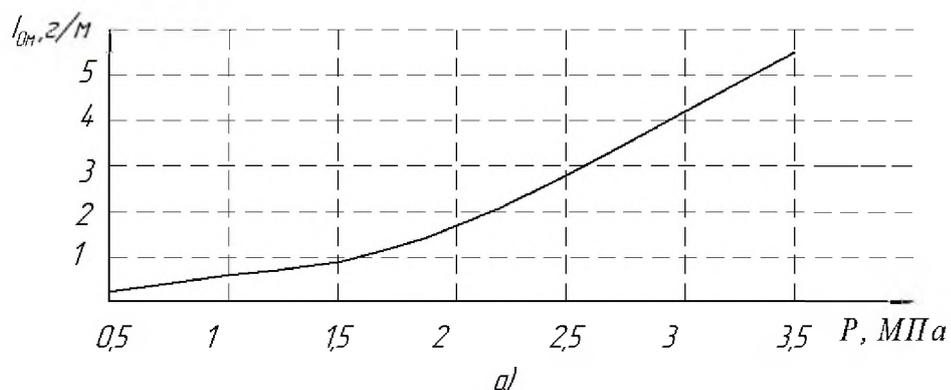


Рисунок 3.13 Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки: а – образец с микрорельефом; б – образец без микрорельефа. Скорость скольжения индентора $v = 4,5$ м/с

Можно отметить, что интенсивность изнашивания и в первом и во втором случаях имеет сходный закон распределения, но образцы с микрорельефом имеют значительно меньший абразивный износ при всех значениях нагрузки. После испытаний образцы с микрорельефом, на которые

воздействовали небольшие нагрузки (от 0,5 до 3,5 МПа) практически не имели признаков абразивного изнашивания.

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что микрорельеф, нанесенный предложенным в данной работе способом, способствует созданию режима жидкостного трения в паре трения лабораторной установки.

Для более детального исследования далее применяли метод снятия и сопоставления температурных полей трения цилиндра при прокрутке двигателя без сжатия, сгорания и охлаждения. При этом в двигатели использовались серийные гильзы, а также гильзы с микрорельефом, который был нанесен предложенным способом с необходимыми шаго-высотными параметрами.

Как можно видеть из графиков на рисунках 3.20–3.25, где представлены температурные поля трения сравниваемых цилиндров при прокрутке поршней. Гильза с микрорельефом во всех случаях обеспечила меньшее тепловыделение от трения по сравнению с серийной гильзой.

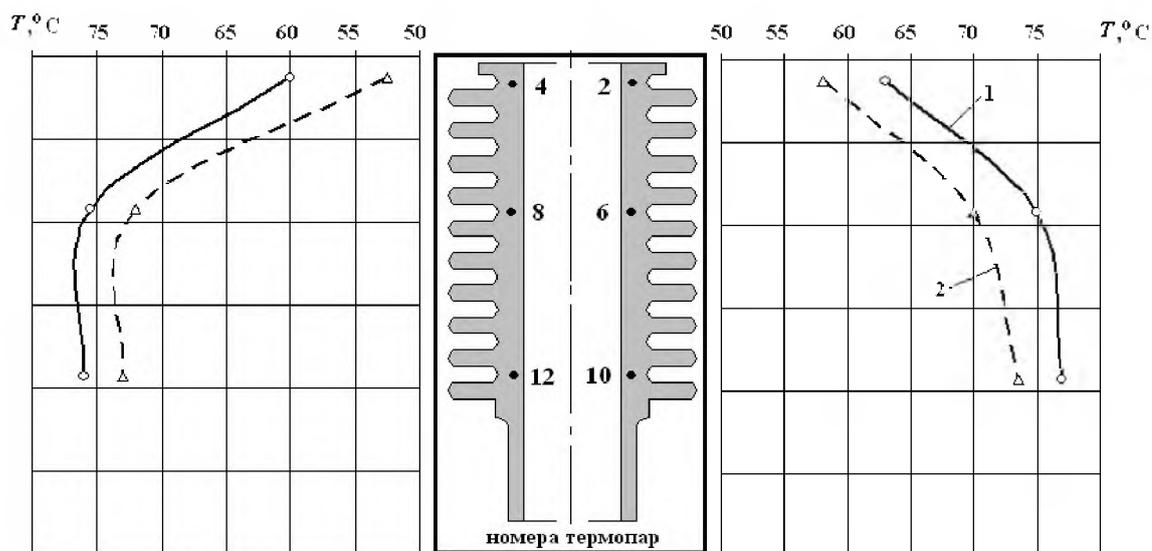


Рисунок 3.14 Температурные поля трения гильзы цилиндра дизеля ТМЗ-450Д в плоскости качания шатуна на скоростном режиме прокрутки 2800 мин⁻¹: 1 – серийная гильза; 2 – опытная гильза

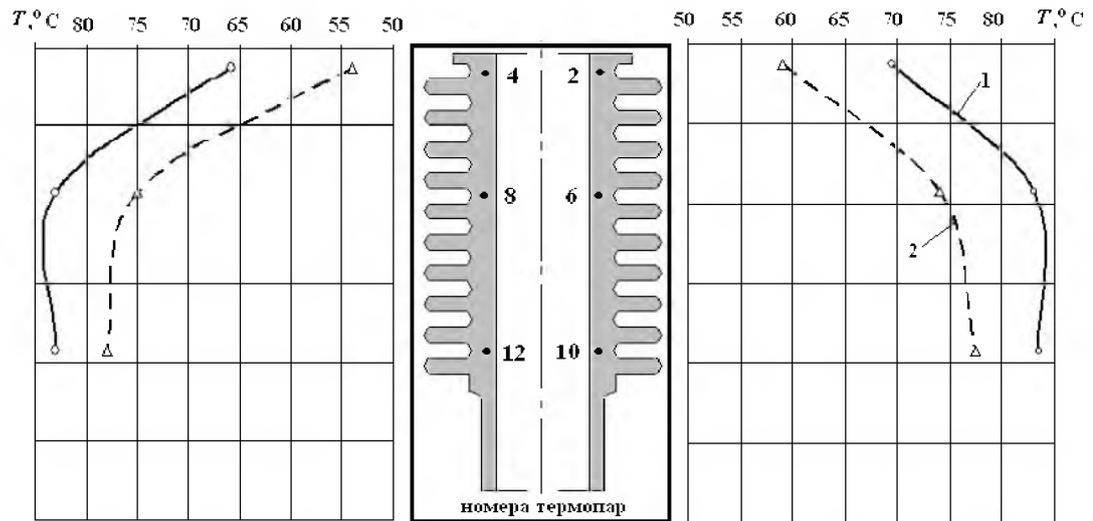


Рисунок 3.15 Температурные поля трения гильзы цилиндра дизеля ТМЗ-450Д в плоскости качания шатуна на скоростном режиме прокрутки 3200 мин^{-1} : 1 – серийная гильза; 2 – опытная гильза

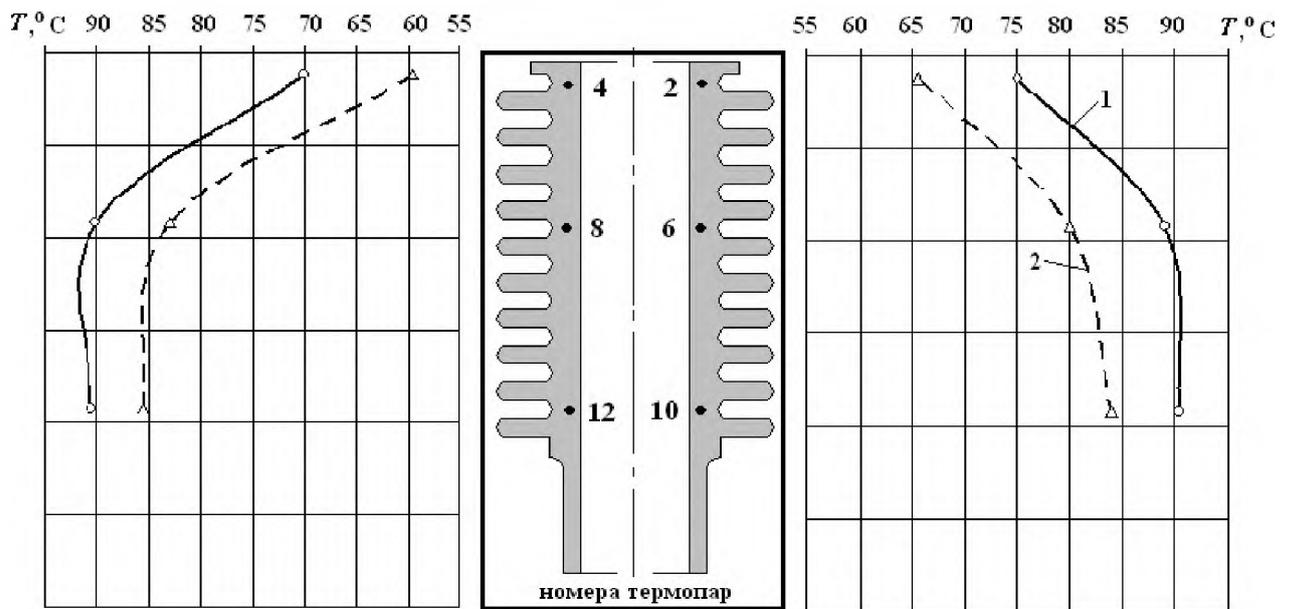


Рисунок 3.16 Температурные поля трения гильзы цилиндра дизеля ТМЗ-450Д в плоскости качания шатуна на скоростном режиме прокрутки 3600 мин^{-1} : 1 – серийная гильза; 2 – опытная гильза

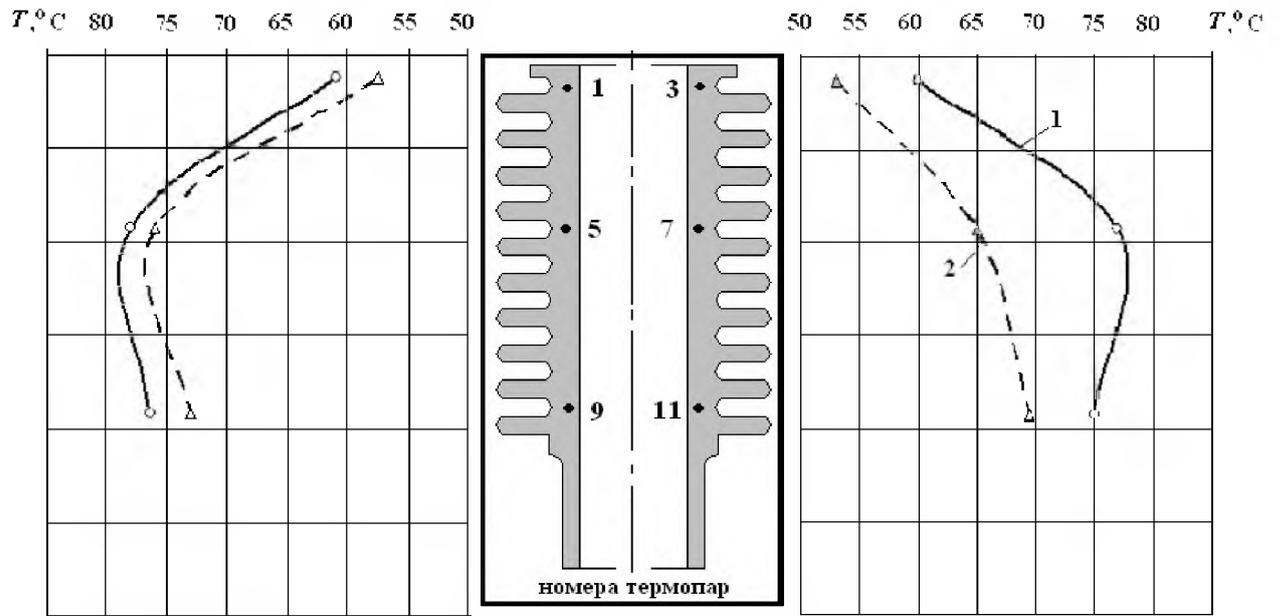


Рисунок 3.17 Температурные поля трения гильзы цилиндра дизеля ТМЗ-450Д в плоскости коленчатого вала на скоростном режиме прокрутки 2800 мин⁻¹: 1 – серийная гильза; 2 – опытная гильза

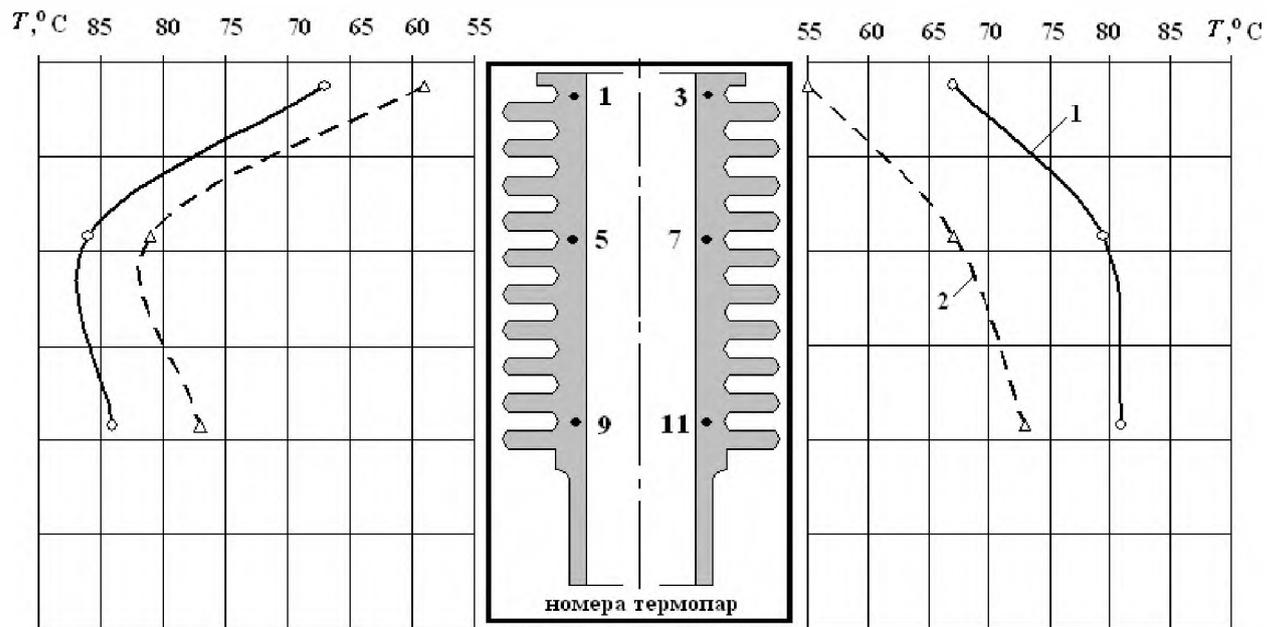


Рисунок 3.18 Температурные поля трения гильзы цилиндра дизеля ТМЗ-450Д в плоскости коленчатого вала на скоростном режиме прокрутки 3200 мин⁻¹: 1 – серийная гильза; 2 – опытная гильза

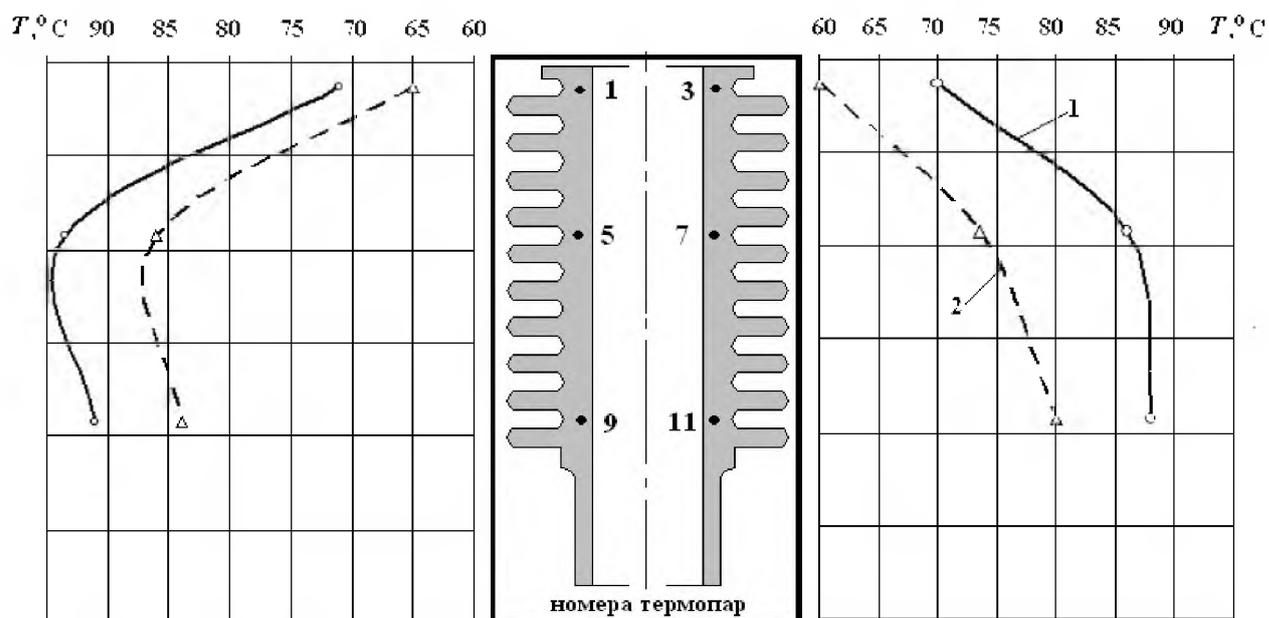


Рисунок 3.19 Температурные поля трения гильзы цилиндра дизеля ГМЗ-450Д в плоскости коленчатого вала на скоростном режиме прокрутки 3600 мин^{-1} : 1 – серийная гильза; 2 – опытная гильза

Так как прокрутка двигателя происходила без сжатия и сгорания, то боковая сила поршня определялась исключительно его силой инерции. Поэтому сопоставление характера изменения температуры трения по высоте цилиндра на рисунках 3.20–3.25 показывает, что максимальное значение температуры приходится на центральный и нижний пояса. Это может быть объяснено тем, что в центральном поясе скорость поршня с кольцами достигает своего максимального значения: преимущественно жидкостное трение этих деталей в условиях прокрутки также приходит к максимуму, чем обуславливает наибольшее тепловыделение от трения в указанной зоне. Превышение температуры в нижнем поясе над температурой в верхнем предположительно объясняется охлаждающим действием входящего воздуха через открытое отверстие под форсунку.

Таким образом, наиболее обусловленной трением является температура в центральном поясе цилиндра (рисунок 3.26).

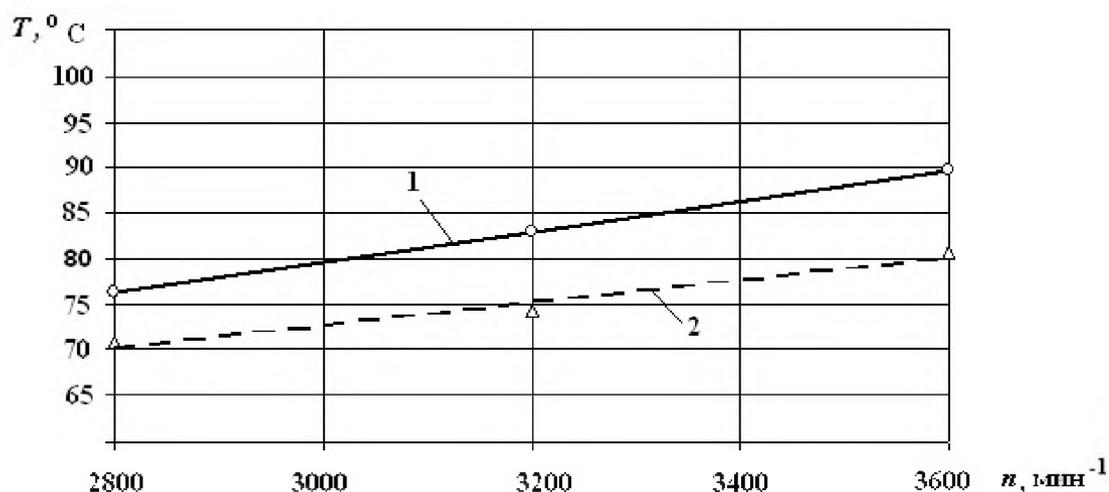


Рисунок 3.20 Изменение средней температуры трения в центральном поясе стенки гильзы цилиндра в зависимости от частоты вращения при прокрутке дизеля ТМЗ-450Д без сжатия, сгорания и охлаждения: 1 – серийная гильза; 2 – опытная гильза

Из графика на рисунке 3.20 видно, что:

1. средняя температура трения в этом поясе растет практически пропорционально частоте вращения коленчатого вала, что характерно для гидродинамического трения деталей [76-80, 101];

2. с увеличением частоты вращения разница температур трения между серийной и опытной гильзой плавно нарастает;

3. на всем скоростном диапазоне температура трения при использовании опытной гильзы значительно (на 7–9 °C или на 9–10%) ниже температуры серийной гильзы.

Данные представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Значения средней температуры трения стенки цилиндра в центральном поясе при прокрутке дизеля без сжатия, сгорания и охлаждения.

$n, \text{мин}^{-1}$	$T, ^\circ\text{C}$	
	Опытная гильза	Серийная гильза
2800	71	76
3200	74	83
3600	81	90

Метод температурных полей трения на средней частоте вращения 2800 мин^{-1} показал снижение температуры трения опытной гильзы на 5 °C (7%). С ростом частоты вращения от 3200 мин^{-1} до 3600 мин^{-1} эффективность опытной гильзы значительно увеличилась. При этом зафиксированное снижение

температуры трения на рабочей поверхности гильзы с микрорельефом составило в среднем не менее 9 °С (10%) (см. таблица 3.3).

Выводы.

1. Разработан способ образования микрорельефа на внутренней поверхности гильзы цилиндра, который включает образование выступов поверхности оплавлением лазерным излучением с последующим хонингованием выступов микрорельефа до необходимой высоты.

2. Определены, с точки зрения максимизации гидродинамической несущей способности, шаго-высотные параметры микрорельефа, которые могут обеспечить минимальный, но достаточный зазор в сопряжениях цилиндропоршневых групп для обеспечения жидкостного трения.

3. Исследована износостойкость внутренней поверхности гильзы цилиндров. Для оценки износостойкости были проведены триботехнические испытания в три этапа на экспериментальных стендах в условиях, приближенных к реальным. В результате были получены как прямые, так и косвенные подтверждения эффективности микрорельефа на внутренней поверхности гильзы. При этом результаты представлены в виде графиков, которые в полной мере отражают преимущества износостойкости поверхностей с нанесенным на них микрорельефом над аналогичными поверхностями без микрорельефа.

Раздел 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИБОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Анализ показал, что способ трибомодифицирования поверхностей трения наноразмерными алмазосодержащими добавками позволяет значительно снизить интенсивность изнашивания трущихся поверхностей (до 50 %) и повысить технико-эксплуатационные показатели в 1,5–2,0 раза.

В настоящее время учеными всего мира большое внимание уделяется нанотехнологиям. С целью повышения противоизносных и антифрикционных свойств пластичных смазочных материалов применяют их модифицирование наноразмерными алмазосодержащими добавками. При этом на поверхности изделия образуется сплошная, покрывающая всю поверхность пленка, которая предотвращает непосредственный контакт микровыступов шероховатостей, что снижает фрикционный контакт. Используют как синтетический, так и природный технический алмазный порошок. Это позволяет расширить диапазон рабочей температуры и нагрузки, воспринимаемых соединениями.

Таким образом, модифицирование пластичных смазочных материалов наноразмерными алмазосодержащими добавками обеспечивает повышение противозадирных свойств, позволяет интенсифицировать процесс приработки контактирующих поверхностей за счет повышения их твердости при измельчении структуры поверхности трения в процессе интенсивной пластической деформации микронеровностей под воздействием твердых частиц алмаза и в результате дисперсного упрочнения при внедрении частиц алмаза в поверхность трения [15]. Авторы рассматривали процессы с применением ультрадисперсных алмазов (УДА) в качестве модификатора смазочных материалов. Это обусловлено рядом факторов: наноалмазы структурируют масляную пленку, увеличивают ее динамическую прочность, действуют на кристаллическую решетку поверхности металла, упрочняя ее, формируют новые поверхности трения, уменьшая граничное трение и износ (особенно при больших нагрузках). Эти качества УДА реализуются многими разработчиками смазочных материалов с целью повышения антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов, расширения диапазона их рабочих температур и нагрузок. Однако, следует отметить, что использование в качестве добавки природного технического алмазного порошка приводит к необходимости тщательного отбора и контроля однородности применяемого природного материала как по размерам частиц, так и по их составу [18]. Отмечается, что модифицирование пластичных смазочных материалов наноразмерными алмазосодержащими добавками обеспечивает повышение противозадирных свойств, оказывает приработочный эффект за счет повышения твердости контактирующих поверхностей при измельчении структуры поверхности трения в процессе интенсивной пластической деформации микронеровностей под воздействием

твердых частиц алмаза и в результате дисперсного упрочнения при внедрении частиц алмаза в поверхность трения. Также способствует снижению коэффициента трения в результате уменьшения шероховатости поверхности трения и частичной замене трения скольжения на трение качения.

Выбор материалов представляет собой трудную задачу и зависит от конструкции и назначения узла, условий эксплуатации, срока службы. При изучении свойств пластичных смазочных материалов (ПСМ) отмечается, что они в значительной степени определяются структурой их дисперсной фазы (ДФ), представляющей собой каркас, формирование которого проходит в две стадии: а) образование первичных мицелл (центров кристаллизации), их рост и развитие до макроассоциатов определенных размеров; б) взаимодействие образующихся макроассоциатов друг с другом с появлением трехмерной объемной структуры. Эффективными модификаторами смазочных материалов являются нано-размерные добавки различной природы, однако их введение в ПСМ представляет значительную технологическую сложность, связанную с трехмерностью структуры ДФ пластичных смазок и склонностью наночастиц к агрегированию. При введении наночастиц в ПСМ на стадии охлаждения после образования структурного каркаса смазки частицы добавки остаются свободно мигрирующими в дисперсионной среде (ДС), сохраняя возможность объединяться в агрегаты, ухудшающие реологические и трибологические характеристики ПСМ.

Было уделено внимание и вопросам технологии безразборного ремонта ДВС, агрегатов трансмиссии и гидрооборудования машин и оборудования всех отраслей с помощью высокодисперсных порошков минералов группы серпентина.

Серпентиновые трибопрепараты, слоистые силикаты магния или геомодификаторы (ГМТ), создают на поверхностях трения необычное покрытие и другие условия трения, в то время как присадки лишь улучшают его. ГМТ, являясь инструментом в извечной борьбе с трением и износом, уносящими ежегодно до 15 % ВВП, приближают условия «безизносности», что особенно важно для дорогостоящих агрегатов. При этом было отмечено, что получение наноматериалов возможно только при воздействии на исходный материал концентрированных потоков энергии. Обеспечение равномерного воздействия потока энергии на весь объем обрабатываемого материала вызывает при использовании электронных пучков и лазерного испарения большие технические трудности. Применение электровзрывного метода для этого позволяет реализовать однородный нагрев, испарение материала проводников и образование плазмы. Продукты электрического взрыва проводников представляют собой слабоагломерированные нанопорошки металлов и сплавов.

Исследование триботехнических свойств композиционного наноуглеродного материала показало, что его применение в качестве

присадок к маслам для узлов качения и скольжения приводит к уменьшению коэффициента трения для пары сталь-сталь на 25%, при этом износ поверхностей трения уменьшается в четыре раза, а их шероховатость – вдвое. Изменение триботехнических характеристик пар трения при использовании наноуглеродной присадки к смазочному маслу, содержащей фуллерены и наноалмаз, скорее всего обусловлено образованием на поверхности металла алмазоподобной пленки.

Методы трибомодифицирования включают в себя способы восстановления поверхностей трения в режиме непрекращающейся эксплуатации с применением добавок к смазочным материалам, содержащих дисперсные природные слоистые силикаты. Применение подобных добавок способно обеспечить восстановление изношенных поверхностей с формированием на поверхностях трения металлокерамических покрытий, имеющих повышенную износостойкость.

К триботехнологическим методам следует также отнести технологические приемы повышения триботехнических свойств пар трения и увеличения ресурса трибосопряжений путем их приработки в присутствии смазочного материала, содержащего наноразмерные твердые компоненты, в частности наноразмерные алмазы. Твердые наноразмерные частицы, введенные в состав смазочной среды, оказывают комплексное воздействие на трибосистему, увеличивая ее долговечность. Данный метод повышения износостойкости с нашей точки зрения, является одним из наиболее перспективных.

Применение приработочных препаратов при ремонте машин и механизмов позволяет интенсифицировать приработку, тем самым сократить продолжительность этапа приработки и продлить зону установившегося режима изнашивания. За счёт этого уменьшается число отказов машин и механизмов в период эксплуатации и повышается их срок службы.

В качестве приработочных составов используют смазочные составы, содержащие твердые компоненты (алмазный порошок, карбиды, оксиды кремния и др.), полимеры.

Приработочные препараты на основе наноалмазов позволяют сократить время обкатки и оптимизировать качество трущихся поверхностей. Алмаз исполняет роль абразивного материала, за счет чего в процессе эксплуатации происходит процесс субмикрорезания одиночных микровыступов, что приводит к заметному увеличению фактической площади контакта пар трения.

При исчерпании доремонтного и межремонтного ресурса пар трения машин и механизмов применяют ремонтно-восстановительные составы (РВС), которые при эксплуатации образуют на поверхностях трения антифрикционные противоизносные покрытия длительного действия. Их применение позволяет восстановить изношенные поверхности трибосопряжений до первоначальных параметров. В качестве приработочных

составов используют смазочные составы, содержащие твердые компоненты (алмазный порошок, карбиды, окиси кремния и др.), полимеры.

Известные в настоящее время РВС по компонентному составу, физико-химическим процессам их взаимодействия с трущимися поверхностями можно разделить на три группы: реметаллизанты (металлоплакирующие составы), полимерсодержащие препараты и геомодификаторы.

Металлоплакирующие смазки могут быть использованы для всех типов узлов трения: крестовин, наконечников рулевых тяг, подшипников, шестерен и др. В состав таких смазок входят порошки металлов, их оксиды, сплавы, соли, комплексные и другие соединения. Механизм их действия заключается в металлоплакировании трущихся поверхностей вследствие осаждения металлических компонентов, входящих в их состав, во взвешенном или ионном виде. При этом частично устраняются микродефекты, снижается коэффициент трения, значительно повышается износостойкость плакированных поверхностей, увеличивается интервал между заменами смазки, а также они успешно работают в тяжело нагруженных узлах трения. Однако для существования металлоплакирующего слоя необходимо постоянное присутствие реметаллизанта в масле.

Состав разработан на основе литола с применением высокодисперсного порошка наполнителя (цинка, бронзы или свинца), полученного методом испарения и конденсации в атмосфере нейтрального газа на вакуумной установке, обеспечивающего безизносную работу пар трения в процессе их эксплуатации и позволяющий восстановить уже изношенную поверхность трения при одновременном сохранении основных технологических показателей смазки.

Механизмы смазочного действия подобных смазочных композиций в значительной степени обуславливаются видом введенных в них присадок или наполнителей и нагрузочно-температурными условиями их применения, т.е. условиями эксплуатации узла трения. Чаще всего основную роль в снижении интенсивности изнашивания трущихся деталей отводят образованию на поверхности трения металлических пленок.

Основным недостатком пластичных смазок с металлоплакирующими компонентами является недолговечность дисперсной фазы смазки, в связи с чем применение добавок металлических порошков в антифрикционных пластичных смазках ограничено. Для снижения влияния минимизации этого эффекта плакирующие компоненты смазочного материала должны иметь стабильный наноразмерный уровень, помещены в специальную защитную оболочку, позволяющую исключить их окисление, и иметь механизм запуска реакции взаимодействия с поверхностью трения в процессе эксплуатации.

Ещё одним методом повышения долговечности трибосопряжений за счёт модифицирования поверхностей трения является применение металлоплакирующих смазок, в состав которых введены дисперсные ферромагнетики. Практическое значение имеют переходные металлы, а

также некоторые их интерметаллические соединения, например, железо-никель, железо-кобальт. Наиболее широко применяют магнетит. Он имеет хорошую адсорбционную способность по отношению к ПАВ, а также способен образовывать коллоидные дисперсии с высокой намагниченностью.

Для повышения надежности и экономичности двигателей применяют полимерсодержащие препараты, включающие в своем составе политетрафторэтилен (тефлон), поверхностноактивированный фторопласт-4, перфторпропиленоксид, перфторполиэфир карбоновой кислоты (эпилам), силикон и некоторые другие полимерные вещества. Эти препараты появились раньше остальных и изначально использовались для обеспечения кратковременного сохранения подвижности боевой техники в случае серьезного повреждения масляной системы.

Чем меньше размеры частиц алмазного порошка, тем больше попадает их в зону фрикционного контакта, чем обеспечивается большая противоизносная эффективность.

Была рассмотрена технология применения ФАБО (финишная антифрикционная обработка) совместно с металлоплакирующими составами, которая позволяет увеличить срок службы трибосопряжений в 2,0–2,5 раза. Однако, это возможно только при постоянном наличии металлоплакирующих составов в зоне контакта поверхностей трения.

Метод плакирования гибким инструментом, основанный на использовании в стандартных технологиях шлифования в качестве инструмента вместо абразивных кругов дисковых проволочных щеток, изготовленных из металлов и сплавов, формирующих металлоплакирующий слой на рабочей поверхности обрабатываемой детали, позволяет интенсифицировать ФАБО, повысить производительность и улучшить экономические показатели металлоплакирования узлов трения. Также повысить качество и производительность процесса ФАБО возможно за счёт применения вибрации (осцилляции) инструмента – способ ФАБВО (финишная антифрикционная безабразивная вибрационная обработка).

При исчерпании доремонтного и межремонтного ресурса пар трения машин и механизмов применяют ремонтно-восстановительные составы (РВС), которые при эксплуатации образуют на поверхностях трения антифрикционные противоизносные покрытия длительного действия. Их применение позволяет восстановить изношенные поверхности трибосопряжений до первоначальных параметров. Стоимость ремонта по РВС-технологии в 2–3 раза ниже, чем при использовании обычных технологий, что позволяет заменить плановые ремонты планово-предупредительной обработкой с увеличением межремонтного срока в 1,52 раза.

В ходе исследований проводилась работа по оценке возможности применения наноразмерных алмазосодержащих добавок в паре трения: сталь ШХ-15 - сталь 45.

Закаленные стали с высокой твердостью, упрочняемые мартенситным превращением применяются для ответственных деталей машин. В условиях эксплуатации, особенно под напряжением, в метастабильной структуре закаленной стали могут проходить значительные изменения, приводящие к нарушению геометрических размеров изделий. Уже в ненагруженных закаленных деталях наблюдаются существенные изменения объема и размеров во времени. Эти изменения обусловлены диффузионными процессами перемещения атомов углерода в мартенсите, сопровождающиеся уменьшением размеров, и процессами распада остаточного аустенита – с увеличением размеров.

Для реализации трибомеханического взаимодействия поверхностей трения использовали смазки:

- базовое масло И20А (тип – минеральное, ГОСТ: 20799-88, индустриального типа, вязкость кинематическая при 40 °С – 29–35 мм²/с вязкость по ГОСТу – 32 класс);

- масло И20А с добавлением наноразмерных алмазосодержащих добавок от 0,045% НА до 0,9% НА (рис. 4.1, 4.2).

Базовым продуктом для производства смазочных материалов группы И20 служит сернистая либо малосернистая нефть. Индустриальные смазки производят способом глубокого прорабатывания нефти.

Задачей этого нефтепродукта является достижение комплексной цели:

- защитить трущиеся поверхности деталей от повышенной температуры;
- максимально обезопасить элементы механизма от коррозии;
- очистить контактную зону от посторонних образований и не допустить пенообразования;
- уберечь механизм от преждевременного «старения»;
- наилучшим образом уплотнить систему.

Образцы масел и концентрация в них наноразмерного алмазосодержащего компонента представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Образцы масел и концентрация наноразмерного алмазосодержащего компонента

№ образца Масло И20А	Процентное содержание наноразмерных алмазосодержащих добавок
1	базовое масло И20А
2	0,5–0,045% НА
3	1,0–0,09% НА
4	2,0–0,18% НА
5	3,0–0,27% НА
6	4,0–0,36% НА

7	5,0–0,45% НА
8	6,0–0,9% НА

Исследование влияния удельной нагрузки испытаний на триботехнические свойства сопряжений «сталь ШХ15 – сталь ШХ15» при работе в условиях трения со смазкой базового масла И-20А стандартного состава (ГОСТ 20799-88) и модифицированными наноразмерными алмазосодержащими добавками проводились по схеме «палец-диск». Оценка величины износа осуществлялась по потере массы при испытаниях на пути трения 1000–3000 м. Изменение коэффициента трения определялось в начале движения (первые 100 метров пути трения).

Относительное снижение коэффициента трения при содержании 0,045% НА составляет 5,1%, а в базовом масле И20А – 1,7%, это свидетельствует о более длительном периоде приработки. В то же время, абсолютное значение коэффициента трения после 100 метров пути трения меньше, чем в базовом масле И20А и составляет 0,111 (рис. 4.1).

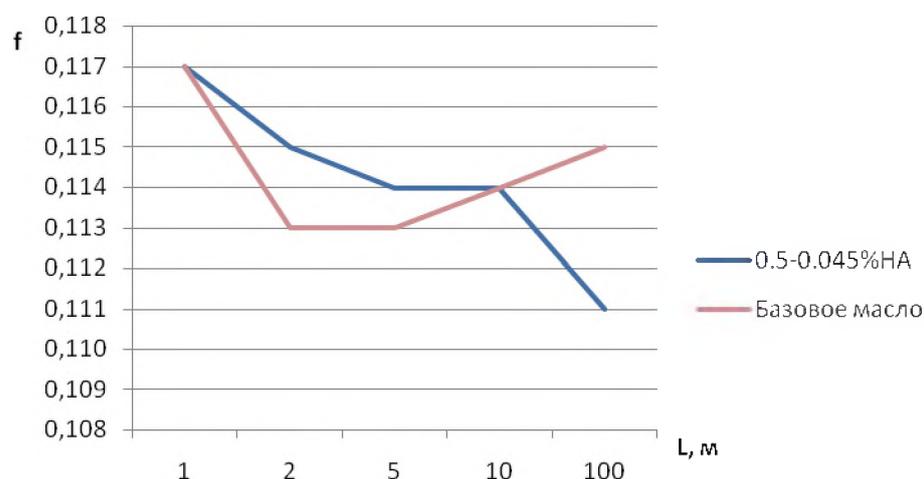


Рисунок 4.1 Зависимость коэффициента трения f базового масла и масла с содержанием 0,5 – 0,045 % на пути трения L

При увеличении содержания наноалмазов в композиции до 0,09% НА кривая коэффициента трения носит аналогичный характер. Относительное снижение коэффициента трения увеличивается до 6,6%. (рис. 4.2)

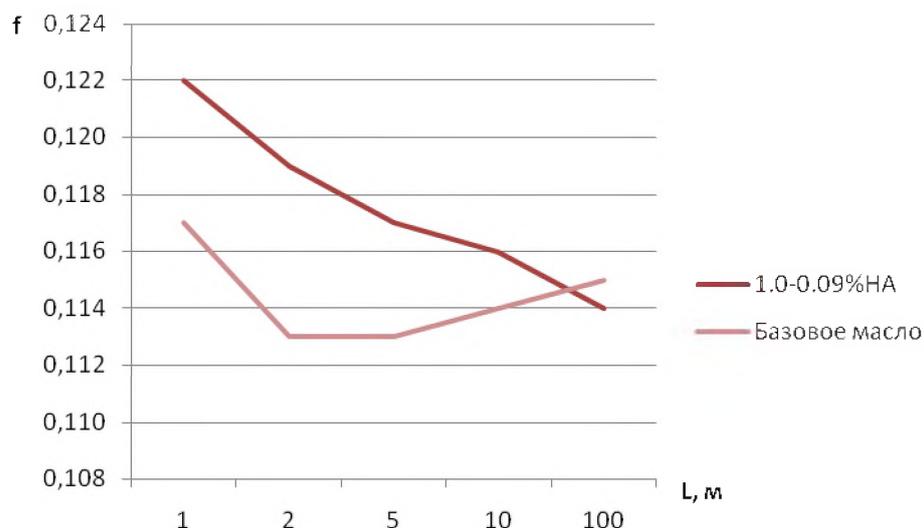


Рисунок 4.2. Зависимость коэффициента трения f базового масла и масла с содержанием 1,0 – 0,009% на пути трения L

При дальнейшем увеличении содержания в композиции наноалмазов до 0,18% НА, график изменения коэффициента трения носит более пологий характер. Относительное снижение коэффициента трения практически не изменяется и составляет 6,7%. (рис. 4.3)

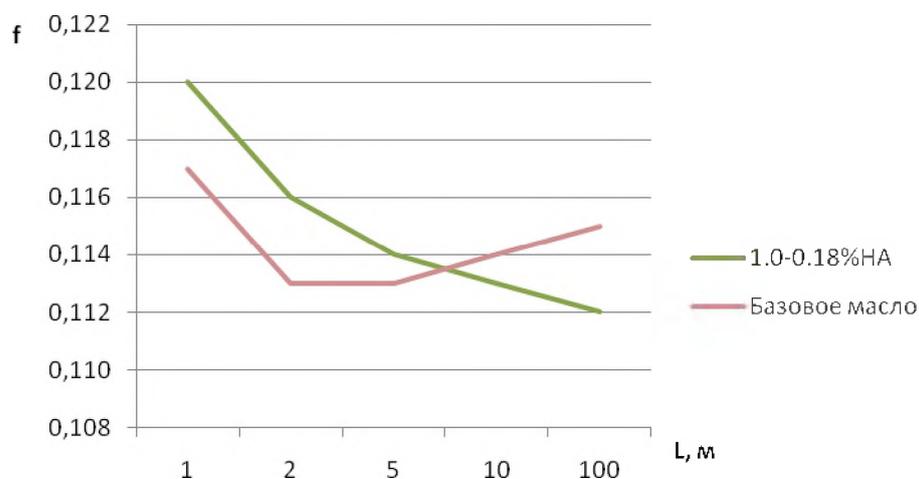


Рисунок 4.3. Зависимость коэффициента трения f базового масла и масла с содержанием 2,0 – 0,18 % на пути трения L

Повышение содержания до 0,27% НА приводит к изменению режима трения. Относительное изменение коэффициента трения составляет менее 1%. Это свидетельствует о том, что практически отсутствует период приработки. Абсолютное значение коэффициента трения после 100 метров пути составляет 0,106, что на 7,8% ниже, чем в базовом масле И20А.

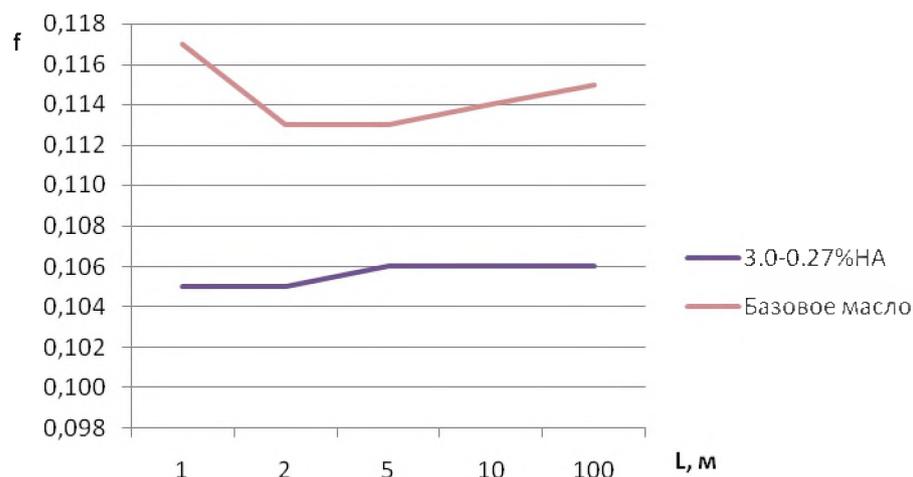


Рисунок 4.4. Зависимость коэффициента трения f базового масла и с содержанием 3,0 – 0,27 % на пути трения L

Дальнейшее повышение наноалмазов до 0,36% приводит к ещё более значительному уменьшению значения коэффициента трения после 100 метров пути трения, которое составляет 0,105. В то же время увеличение содержания наноалмазов приводит к изменению характера кривой трения. Снова появляется период приработки. Относительное снижение коэффициента трения увеличивается до 8,7%. (рис. 4.5)

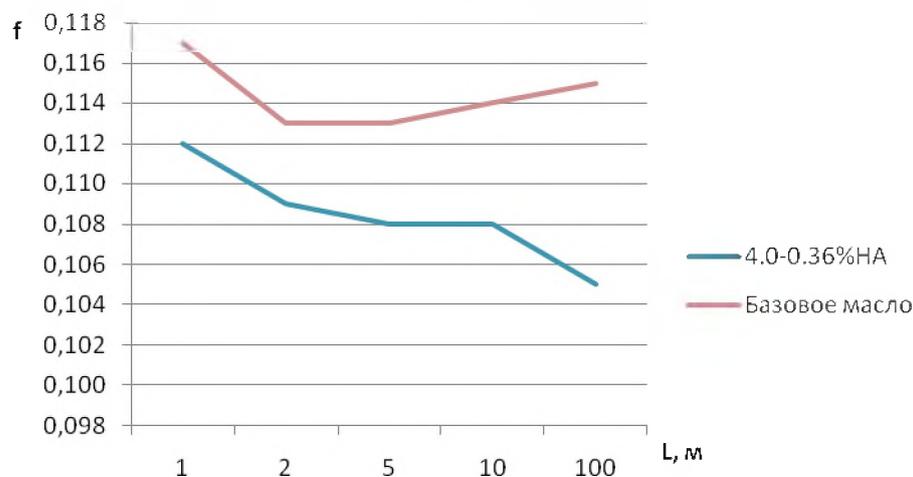


Рисунок 4.5. Зависимость коэффициента трения f базового масла и с содержанием 4,0 – 0,36 % на пути трения L

Повышение содержания наноалмазов до 0,45% приводит к более сложному процессу изменения коэффициента трения. Несмотря на относительное снижение коэффициента трения в 2,7%, изменения носит неблагоприятный характер, в связи с тем, что происходит постепенное увеличение, а затем резкое снижение коэффициента трения. (рис. 4.6)

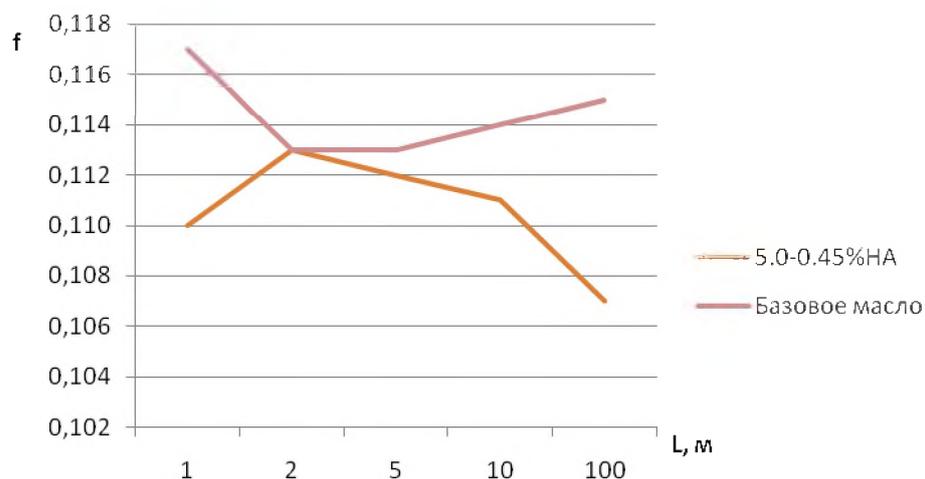


Рисунок 4.6. Коэффициенты трения базового масла и с 5.0 – 0,45 %НА

При содержании 0,9% НА относительное изменение коэффициента трения составляет 1,7%. Это свидетельствует о том, что, как и при содержании 0,27% НА, практически отсутствует период приработки. Численные значения коэффициентов трения так же практически одинаковые (рис. 4.7).

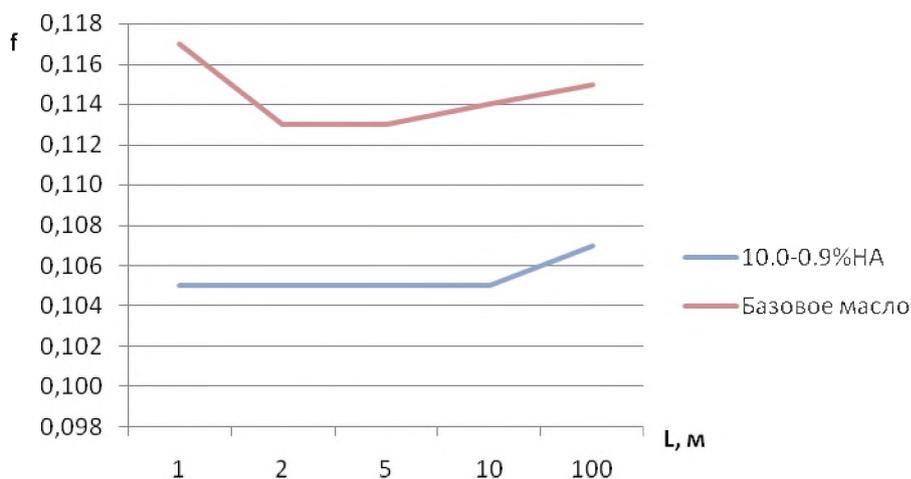


Рисунок 4.7. Коэффициенты трения базового масла и с 6.0 – 0,9 %НА

На рис. 4.8 представлен сводный график коэффициентов трения.

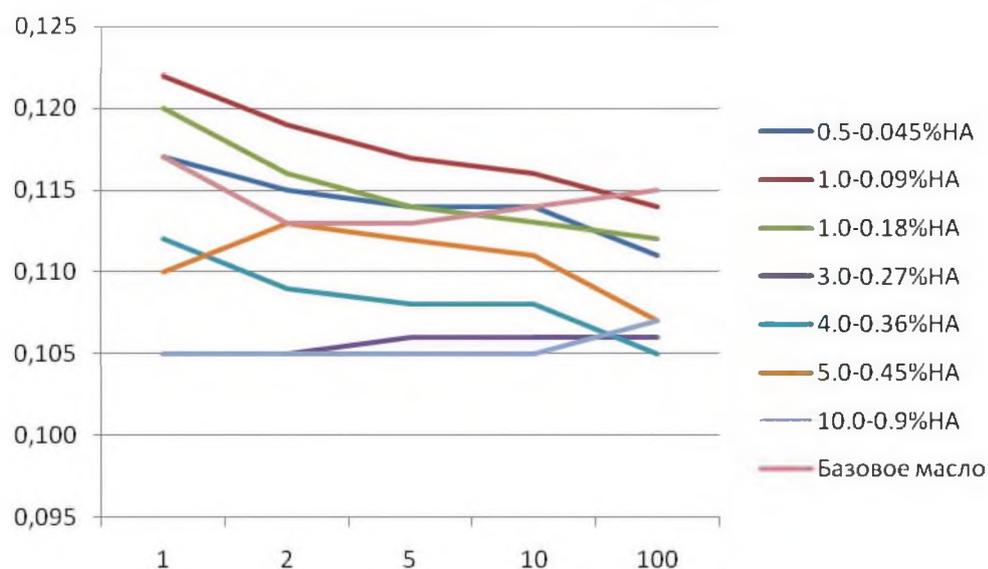


Рисунок 4.8. Сводный график коэффициентов трения

Таблица 4.2. – Сводная таблица результатов исследований

Путь, м	0.5-0.045% HA	1.0-0.09% HA	2.0-0.18% HA	3.0-0.27% HA	4.0-0.36% HA	5.0-0.45% HA	6.0-0.9% HA	Базовое масло
1	0,117	0,122	0,120	0,105	0,112	0,110	0,105	0,117
2	0,115	0,119	0,116	0,105	0,109	0,113	0,105	0,113
5	0,114	0,117	0,114	0,106	0,108	0,112	0,105	0,113
10	0,114	0,116	0,113	0,106	0,108	0,111	0,105	0,114
100	0,111	0,114	0,112	0,106	0,105	0,107	0,107	0,115
200	0,110	0,113	0,111	0,107	0,105	0,107	0,108	0,116
300	0,110	0,113	0,110	0,106	0,105	0,107	0,108	0,115
400	0,111	0,113	0,110	0,106	0,105	0,107	0,108	0,115
500	0,111	0,113	0,110	0,106	0,105	0,107	0,108	0,114
600	0,110	0,113	0,109	0,106	0,102	0,105	0,107	0,115
700	0,110	0,113	0,109	0,107	0,103	0,105	0,107	0,113
800	0,110	0,112	0,109	0,107	0,103	0,105	0,107	0,113
900	0,109	0,112	0,109	0,107	0,103	0,105	0,106	0,112
1000	0,109	0,111	0,108	0,107	0,103	0,104	0,106	0,112
1100	0,110	0,110	0,107	0,106	0,097	0,097	0,104	0,114
1200	0,110	0,112	0,107	0,107	0,098	0,098	0,104	0,113
1300	0,111	0,113	0,108	0,107	0,098	0,098	0,104	0,113
1400	0,111	0,113	0,108	0,107	0,098	0,099	0,104	0,112
1500	0,110	0,113	0,107	0,107	0,097	0,099	0,104	0,112
1600	0,110	0,113	0,107	0,107	0,096	0,098	0,103	0,112
1700	0,110	0,112	0,107	0,108	0,097	0,098	0,103	0,112
1800	0,109	0,112	0,106	0,108	0,096	0,097	0,103	0,111
1900	0,108	0,112	0,107	0,108	0,096	0,097	0,103	0,111

2000	0,108	0,112	0,106	0,108	0,096	0,097	0,103	0,111
2100	0,109	0,107	0,105	0,099	0,097	0,092	0,101	0,112
2200	0,109	0,111	0,107	0,100	0,099	0,094	0,101	0,112
2300	0,109	0,109	0,107	0,101	0,100	0,095	0,100	0,111
2400	0,108	0,109	0,107	0,100	0,099	0,095	0,100	0,111
2500	0,108	0,111	0,107	0,100	0,100	0,095	0,100	0,110
2600	0,108	0,111	0,106	0,099	0,098	0,094	0,097	0,110
2700	0,107	0,111	0,107	0,099	0,098	0,093	0,096	0,109
2800	0,108	0,109	0,106	0,098	0,097	0,093	0,096	0,110
2900	0,107	0,108	0,106	0,098	0,097	0,093	0,094	0,109
3000	0,107	0,107	0,106	0,097	0,095	0,092	0,093	0,109

Используя базовое масло при прохождении контрольного образца от 100 до 1000 метров коэффициент трения остается на одном уровне примерно до 600 м, после чего начинает плавно уменьшаться, что связано, по нашему мнению, с ростом общей температуры (при нагреве происходит расширение масла и, следовательно, увеличение смазывающей способности), что косвенно доказывается при прохождении образца пути от 1100 до 2000 м. После прохождения контрольной точки в 1000 м образцы извлекались и проводились контрольные измерения, затем по истечении некоторого времени, за которое образцы полностью остывали, испытания возобновлялись. Так при 1100 м коэффициент трения составлял 0,114, и затем неуклонно снижался до значения 0,111 при 2000 м. После прохождения контрольной точки (2000 м) образцы вновь подвергались исследованию и до начала следующей серии испытания проходило какое-то время, в течении которого и образец, и среда трения вновь остывали. Так, при значении 2100 м наблюдалось незначительное увеличение коэффициента трения до 0,112 с последующим его снижением до значения 0,109.

Таким образом, после прохождения периода приработки (100 м) наблюдалось незначительное снижение коэффициента трения $\approx 5\%$, что можно объяснить увеличением общей температуры контакта, которое привело к увеличению смазывающей способности жидкости, и этот факт подтверждает выводы о том, что при увеличении температуры смазочные свойства масел улучшаются.

При добавлении к базовому маслу И20А в количестве 0,045% НА наблюдалось не значительное порядка 3% снижение коэффициента трения, при этом динамика износа оставалась идентичной базовым испытаниям.

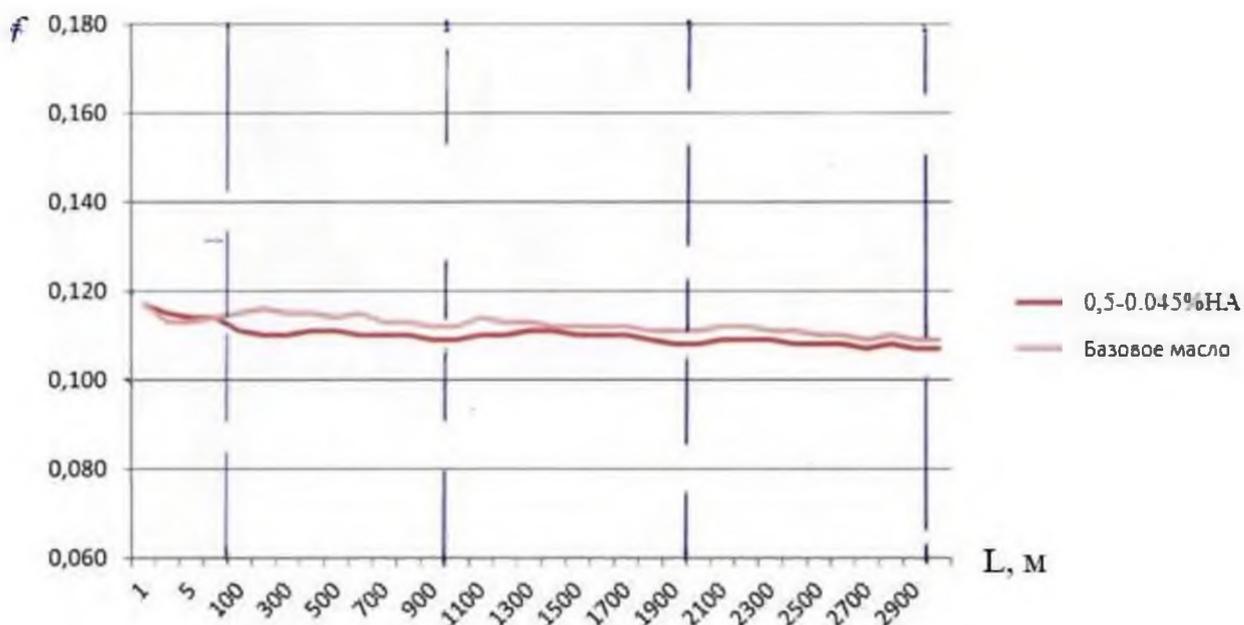


Рисунок 4.9. Коэффициенты трения базового масла и с 0,5 – 0,45 % НА

При добавлении к базовому маслу порядка 0,09 % НА нивелируется эффект присутствия НА в жидкости. Коэффициент трения и динамика изнашивания практически не отличается от базового варианта. (рис. 4.10)

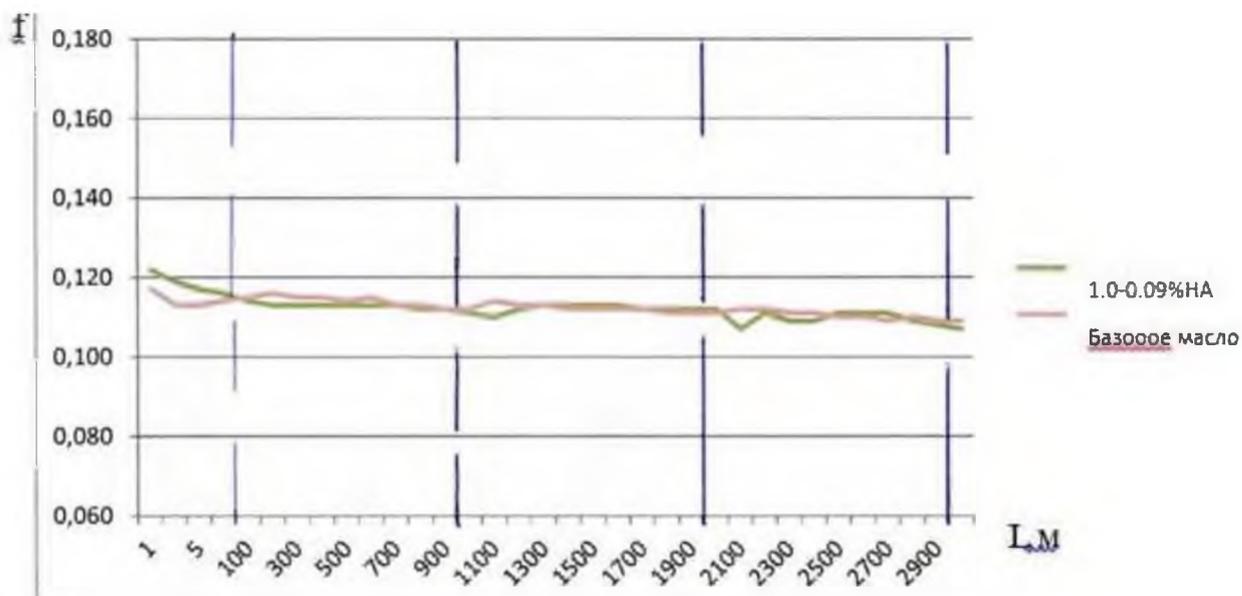


Рисунок 4.10. Коэффициенты трения базового масла и с 1,0 – 0,09 %НА

При добавлении к базовому маслу 0,18% наноалмазов наблюдалось постоянное уменьшение коэффициента трения по сравнению с базовым маслом порядка 5%. При этом при нагреве смеси разница в коэффициентах трения снизилась до 2,7 % при сохранении динамики изнашивания (рис. 4.11).

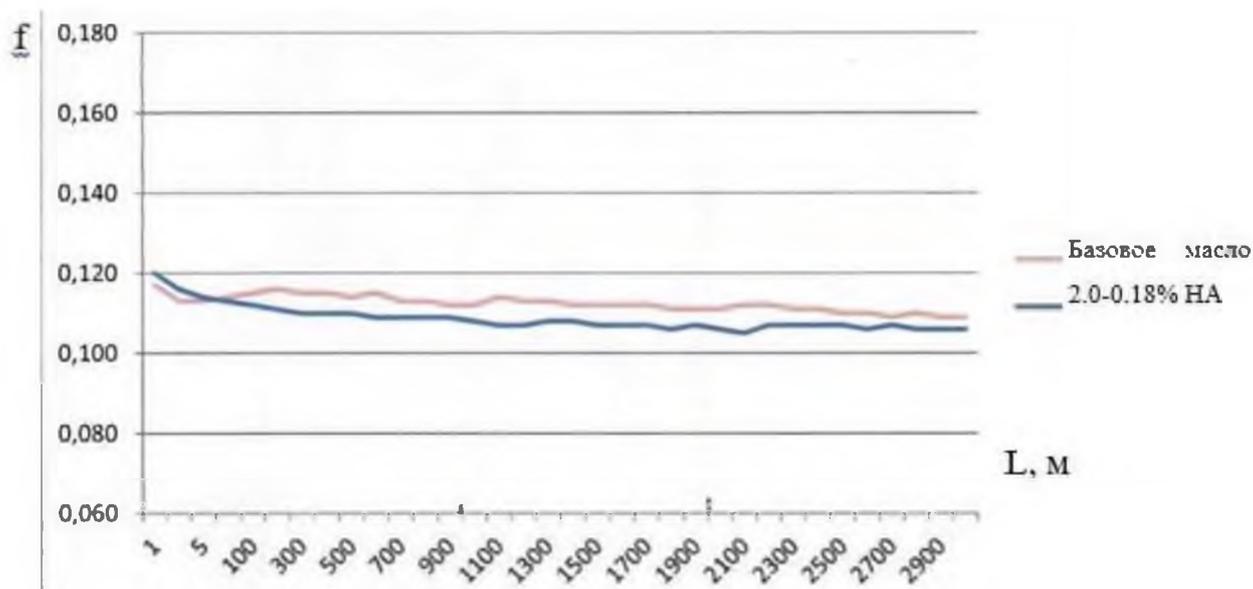


Рисунок 4.11. Коэффициенты трения базового масла и с 2.0 – 0,18 %НА

При добавлении к базовому маслу 0,27% наноалмазов наблюдается качественный скачок в сторону уменьшения коэффициента трения на начальном этапе после периода приработки на 8,6% с уменьшением до 11 % при окончании испытания, при этом при прохождении второй контрольной точки (2000 м), наблюдался качественный скачок, составивший 8,3 % от текущего значения в сторону уменьшения. Для объяснения физического смысла данного явления, по нашему мнению, необходимо проведение дополнительного исследования (рис.4.12).

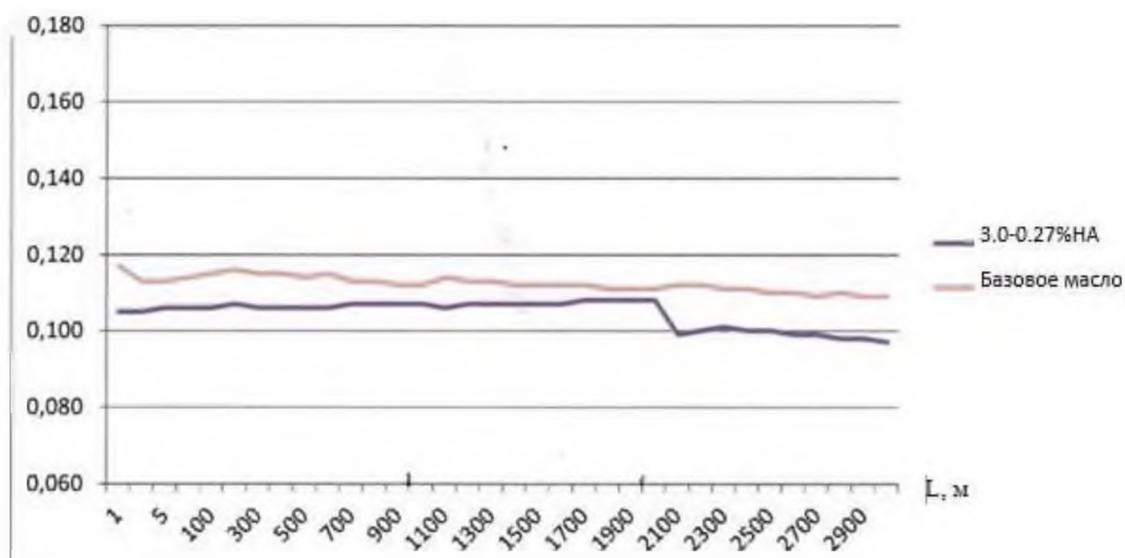


Рисунок 4.12. Коэффициенты трения базового масла и с 3,0 – 0,27 %НА

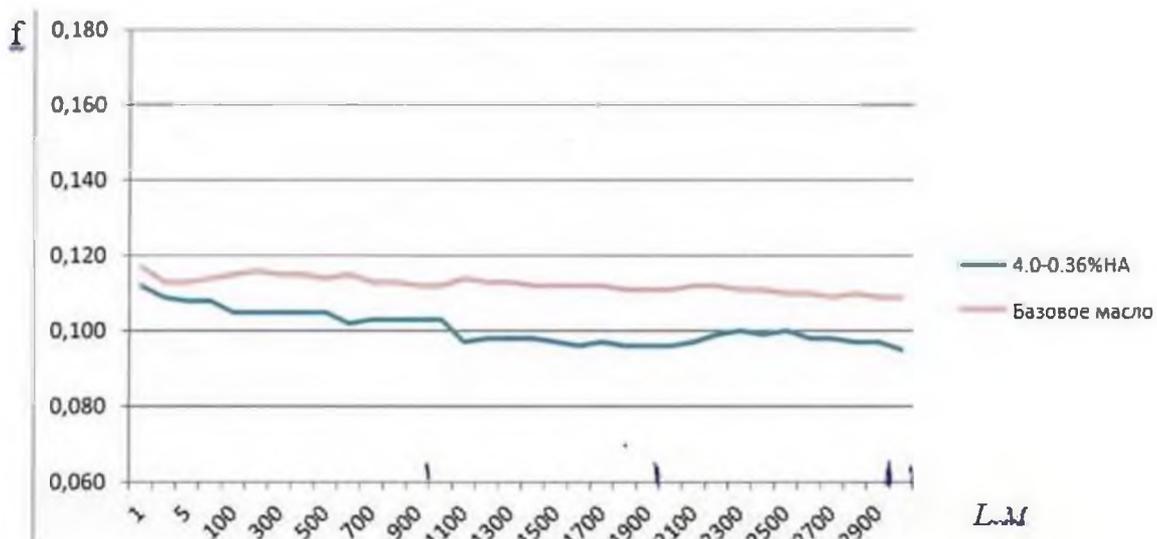


Рисунок 4.13. Коэффициенты трения базового масла и с 4.0 – 0,36 %НА

При добавлении в базовое масло 0,36% наноалмазов заметных качественных изменений в динамике истирания не наблюдалось, за исключением качественного скачка, составившего 5,8 % от текущего в сторону уменьшения при прохождении контрольной точки в 1000 м, что также требует дополнительных исследований (рис.4.13).

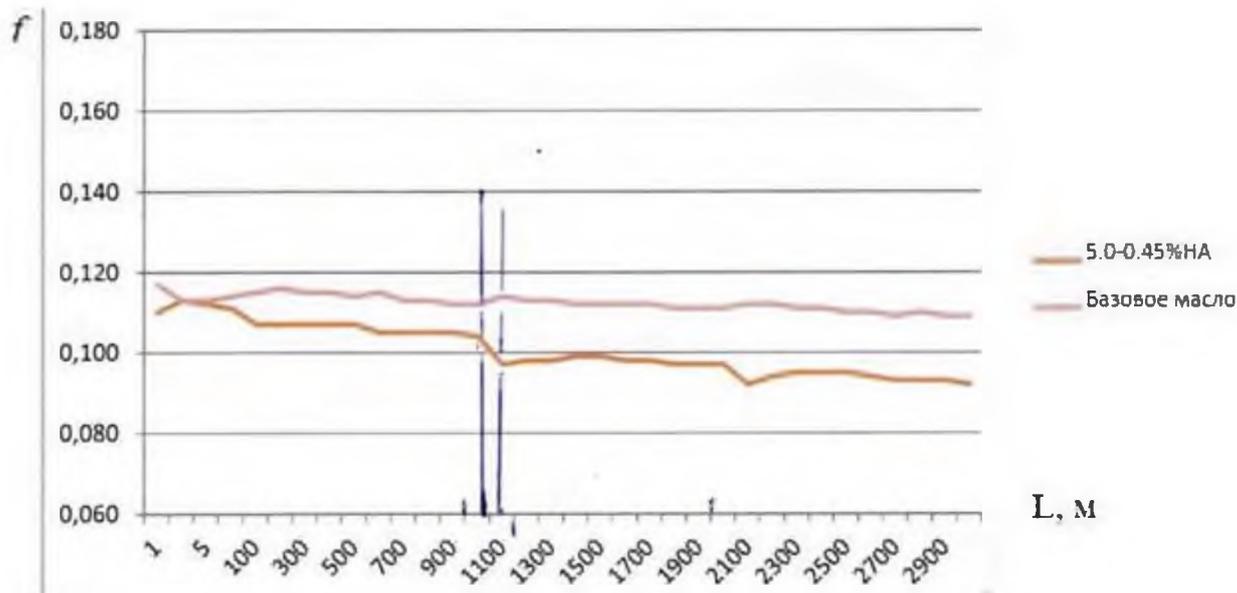


Рисунок 4.14. Коэффициенты трения базового масла и с 5.0 – 0,45%НА

При увеличении содержания наноалмазов до 0,45% наблюдалось увеличение порядка 1,9 % коэффициента трения по сравнению с образцом при 0,36 % содержании наноалмазов. Однако при прохождении полного цикла испытаний значение коэффициента трения по сравнению с базовым снизилось на 16 %, при этом составляя разницу с предыдущим образцов

равной 5 %. При этом были отмечены два качественных скачка при прохождении контрольной точки в 1000 м – 6,7 %, и при прохождении контрольной точки в 2000 м – 5,1 % в сторону уменьшения от текущего значения, объяснение чему могли бы дать дальнейшие исследования (рис. 4.14).

При добавлении к базовому маслу 0,45% наноалмазов наблюдалось незначительное порядка 3 % снижение коэффициента трения, при этом динамика износа оставалась идентичной базовым испытаниям.

При добавлении к базовому маслу 0,9% наноалмазов динамика истирания ничем не отличается от предыдущего образца за исключением отсутствия качественных скачков на контрольных точках (рис. 4.15).

Таким образом, из всех рассмотренных образцов максимальное снижение коэффициента трения наблюдалось у образца с содержанием 0,45 % наноалмазов. В период приработки от 0 до 100 м коэффициент трения снизился на 3,3 %, а в период установленного износа было зафиксировано снижение коэффициента трения до 7,3 % с учетом качественных скачков при прохождении контрольных точек.

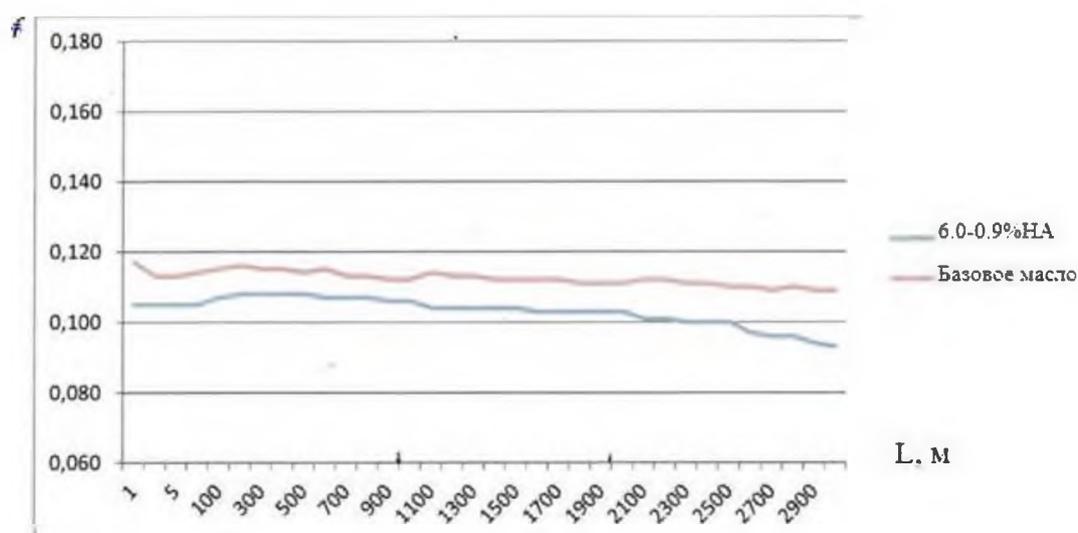


Рисунок 4.15. Коэффициенты трения базового масла и с 6.0 – 0,9 %НА

Параллельно с анализом изменения коэффициента трения проводился анализ массового износа (рис. 4.16) и интенсивности изнашивания (рис. 4.17) пары трения-скольжения, работающих с маслами с разной концентрацией наноалмазных добавок.

На рисунке 4.17 максимальным массовым износом на всем пути трения обладает базовое масло И-20А, минимальным – с содержанием 0,45 % НА, что еще раз подтверждает правильность проведенного анализа по коэффициенту трения.

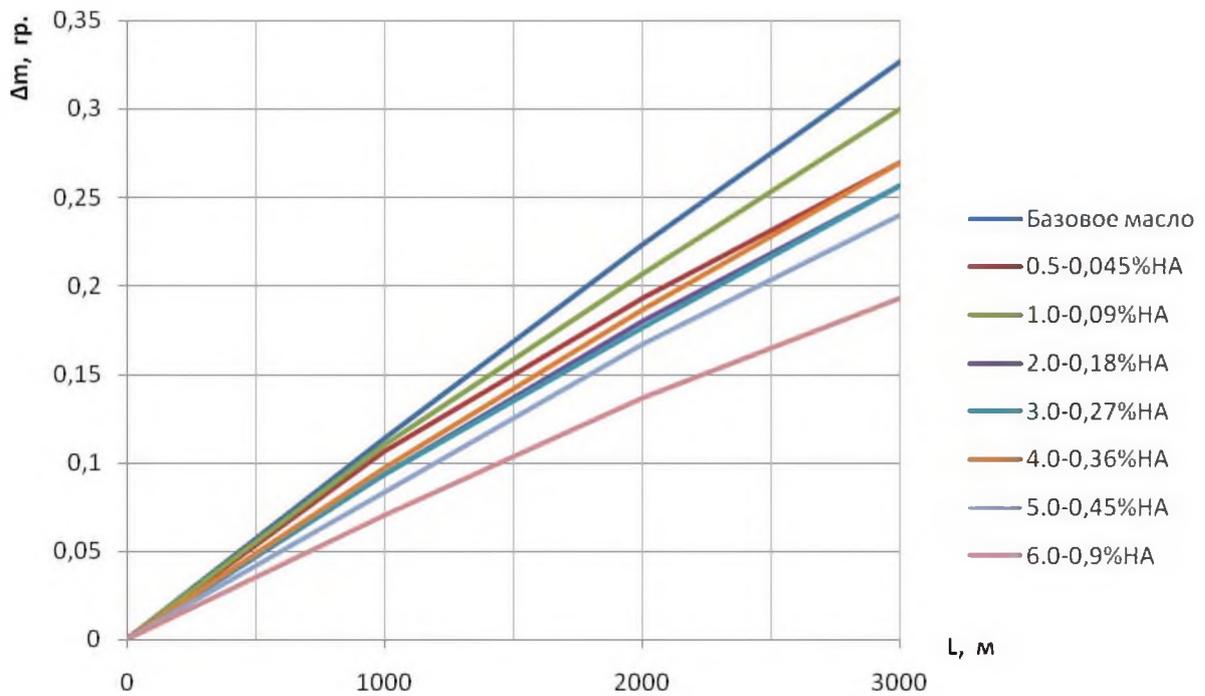


Рисунок 4.17. Зависимость массового износа Δm от пути трения L

Интенсивность изнашивания образцов, работающих в условиях трения скольжения прямо пропорциональна массовому износу (рис. 4.18).

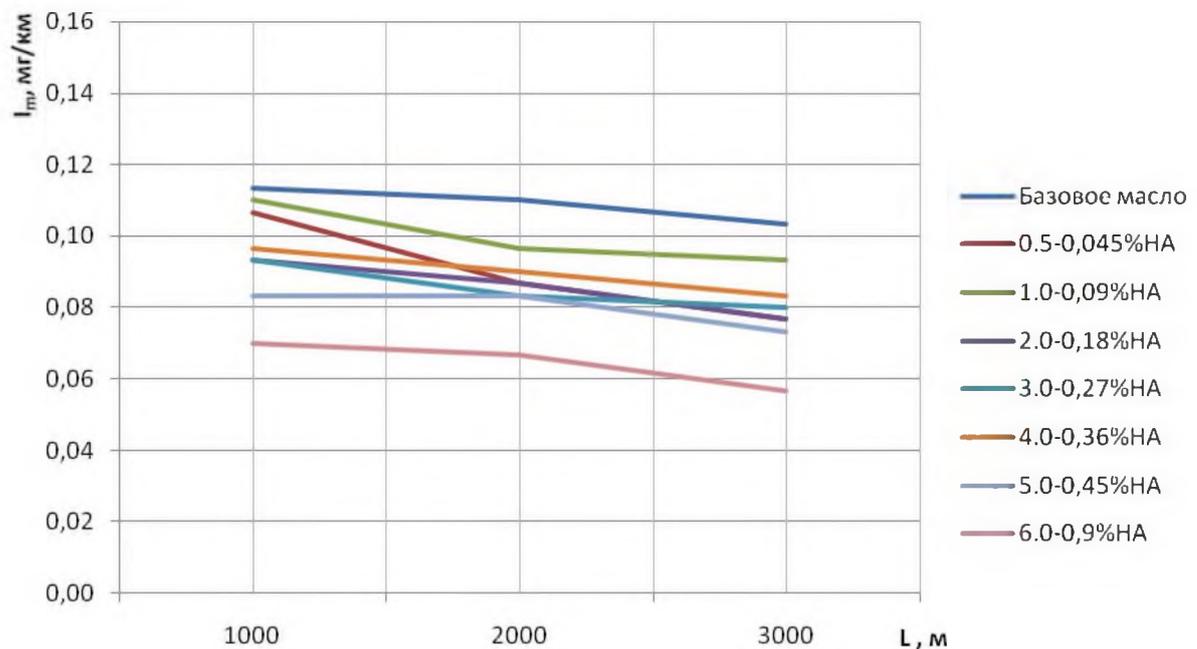


Рисунок 4.18. Зависимость интенсивности изнашивания I_m от пути трения L

На первом участке до 1000 м наблюдаются максимальные значения интенсивности изнашивания. Изменения, происходящие на этом участке коррелируют со значениями, отображающими коэффициент трения (он максимален на данном участке на всех образцах).

В интервале 1000–3000 м наблюдается снижение интенсивности изнашивания и график на этом участке носит монотонно убывающий характер (интенсивность изнашивания снижается на 8–12 %). Наиболее сильные изменения присущи маслу с содержанием 0,045 % НА (~12 %).

На участке свыше 3000 м интенсивность изнашивания и коэффициент трения стабилизируются, поэтому дальнейшие испытания на этом участке были прекращены.

Как правило, первичная обкатка для большинства автомобильных пар трения продолжается в течение первых 2–3 тыс. км пробега. Указанный пробег не является завершением этой процедуры, но с момента его преодоления появляется возможность плавно наращивать нагрузку. Окончательная приработка деталей в зависимости от их качества и качества ремонта обычно достигается к пробегу 10–15 тыс. км. Только после этого можно «потребовать» от двигателя всего того, на что он способен.

Приработка трущихся пар всегда сопровождается их повышенным нагревом. По этой причине обкатка отремонтированного или нового двигателя должна производиться при уменьшенной нагрузке и оборотах коленчатого вала не более 60% от номинальных (с обязательным применением горюче-смазочных материалов, рекомендованных производителем).

Неправильно обкатанный двигатель, часто «располагает» ресурсом, не превышающим и 30% от расчетного значения, заложенного заводом-изготовителем в его конструкцию. Правильно обкатанный двигатель в дальнейшем – гарантия отсутствия отказов на многие тысячи километров пробега.

Целью обкатки является взаимное сглаживание этих микронеровностей при уменьшенных нагрузках на сопряжения. Детали обрабатываются режущим инструментом, а поверхность обработанная режущий инструмент характеризуется определенными размерами микронеровностей, размер которых в конечном итоге и определяет продолжительность обкатки. На ее продолжительность также влияет материал деталей, к примеру, хромированное кольцо, установленное в относительно гладкий, поработавший уже цилиндр, существенно увеличивает период приработки деталей. Использование на время обкатки двигателя самого дешевого, а значит, низкокачественного масла, приводит к негативным последствиям. Так как во время обкатки детали работают в самом напряженном режиме и их поверхности соприкасаются между собой только вершинами микронеровностей (фактическая площадь контакта), всегда остающихся после механической обработки.

В силу того, что фактическая площадь контакта мала по сравнению с номинальной, даже при малых нагрузках на единичных пятнах контакта выступов развиваются давления, достаточные для сближения и возникновения межмолекулярного взаимодействия. Силы межмолекулярного

взаимодействия на пятне контакта вызывают образование фрикционных связей. Для относительного перемещения контактирующих тел необходимо преодоление межмолекулярного взаимодействия и разрыв фрикционных связей. По мере перемещения поверхностей разрыв одних (старых связей) сопровождается образованием других [4]. При этом происходит повышенное локальное нагревание деталей по причине усиленного трения в сопряжении. Если в этот момент дать двигателю (или иному механизму) полную нагрузку, локальный разогрев вершин может вызвать их оплавление и последующие неустраняемые задиры металла, которые в лучшем случае негативно повлияют на ресурс сопряжения. Задиры возникают в результате оплавления и сваривания верхних частей микровыступов между собой. Таким образом происходит вырывание материала с обеих частей пары трения с последующим их перемещением в зазоре, что дополнительно разрушает поверхности соприкосновения деталей. Нередко в таких случаях происходит полное либо частичное заклинивание соединений.

По этим причинам в период обкатки чрезмерная нагрузка и дешевое масло с его, как правило, слабыми противозадирными присадками двигателю категорически противопоказаны. Также противопоказаны разного рода ресурсосберегающие присадки, увеличивающие период обкатки, в некоторых случаях (при применении восстанавливающих присадок) способные заклинить еще не «оформившееся» по зазору сопряжение.

Исходя из результатов полученных исследований, можно порекомендовать режим обкатки, отличающийся от заводских рекомендаций, основанных на том, что в качестве масла для приработки использовать индустриальное масло, содержащее наноалмазные добавки.

Анализ полученных закономерностей показал, что из всех рассмотренных образцов максимальное снижение коэффициента трения и минимальная интенсивность изнашивания наблюдалось у образца с содержанием 0,45 % наноалмазов. В период приработки от 0 до 100 м коэффициент трения снизился на 3,3 %, а в период установившегося изнашивания было зафиксировано снижение коэффициента трения до 7,3 % с учетом качественных скачков при прохождении контрольных точек.

Полученные результаты исследований показывают, что при использовании смазки с наноразмерным алмазным компонентом снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания наблюдается на более ранних стадиях приработки. Можно предположить, что это происходит за счет упрочнения поверхностных слоев стали, их модифицирования частицами ультрадисперсных алмазов в процессе фрикционного взаимодействия. Таким образом, можно рекомендовать применение базового масла с наноразмерными алмазами (~0,45 % НА) для повышения эффективности приработки двигателей внутреннего сгорания после проведения капитального ремонта.

Результатом начального анализа может быть следующее резюме:

Испытания, приведенные на рисунке 4.19, показывают, что влияние модифицирующей добавки в смазке на процессы изнашивания существенно зависит от контактного давления. При относительно низком номинальном контактном давлении ($p_a = 10$ МПа) износ образцов бронза БрБ2 при трении в среде модифицированной смазки существенно превышает (примерно в 2 раза) износ образцов, испытываемых в смазке Литол-24 (рис. 4.19а). Коэффициент трения пары, работающей в среде модифицированной смазки (рис. 4.19б), на начальных стадиях испытаний составляет $f = 0,10-0,14$, и затем, по мере увеличения пути трения l , регистрируется постепенное снижение значений коэффициента трения до $f = 0,087-0,084$ ($l \approx 500-1000$ м) и до $f = 0,075$ ($l \approx 1500-3000$ м). Указанное изменение коэффициента трения с увеличением пути трения l связано с процессами приработки фрикционной пары [69].

В случае применения смазки Литол-24 ход зависимости коэффициента трения от пути трения подобен описанному выше ходу зависимости для смазки с УДАГ. Вместе с тем, значения коэффициента трения на последующих стадиях испытаний превышают соответствующие значения f для случая испытаний со смазкой, содержащей УДАГ, при этом фиксируется более низкое значение массового износа бронзы.

Увеличение контактного давления до $p_a = 20$ МПа приводит к сближению зависимостей массового износа бронзы от пути трения для случаев испытаний в среде модифицированной смазки и смазки Литол-24 (рис. 1в). Вместе с тем следует отметить, что при испытаниях смазки с добавками УДАГ интенсивность изнашивания испытываемых образцов после пути трения 2500 м резко падает. На этой же стадии испытаний (рис. 4.19г) регистрируется и существенное снижение значений коэффициента трения ($f = 0,068$). При использовании смазки Литол-24 интенсивность изнашивания бронзы на протяжении испытаний сохраняется на высоком уровне, а значения коэффициента трения на дальнейших стадиях испытаний даже несколько возрастают и достигают значений 0,110–0,117.

В случае испытаний с контактным давлением 40 МПа комплексной литиевой смазки с УДАГ приводит к существенному снижению интенсивности изнашивания поверхности трения по сравнению с аналогичными испытаниями в среде немодифицированной смазки (рис. 4.19д), а значения коэффициента трения уменьшаются до 0,136 уже на ранних стадиях испытаний (рис. 4.19е). Фрикционные испытания в среде смазки Литол-24 с высоким контактным давлением ($p_a = 40$ МПа) сопровождаются быстрой интенсификацией процессов изнашивания и увеличением значений коэффициента трения до уровня 0,187–0,200 уже на самых ранних стадиях испытаний, по сравнению со значениями при меньшем контактном давлении.

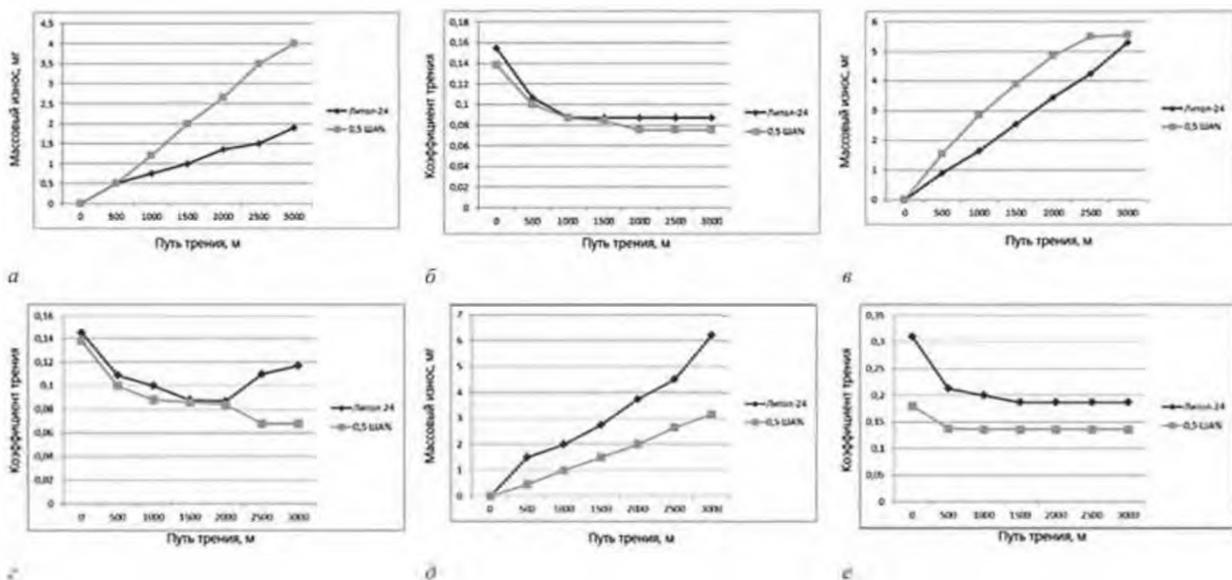


Рисунок 4.19. Зависимость массового износа бронзы БрБ2 (а, в, д) и коэффициента трения (б, г, е) от пути трения при различном контактном давлении:

а, б – 10 МПа; в, г – 20 МПа; д, е – 40 МПа

Исследования влияния контактного давления на режим приработки и триботехнические свойства фрикционной пары «бронза-сталь» при работе в среде смазки Литол-24, проведенные при номинальном контактном давлении, равном 10, 20 и 40 МПа, показали, что с повышением удельной нагрузки снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания при использовании комплексной литиевой смазки с УДАГ наблюдается на более ранних стадиях приработки. Одной из возможных причин указанного эффекта является упрочнение поверхностных слоев бронзы за счет их модифицирования частицами ультрадисперсных алмазов в процессе фрикционного взаимодействия [70].

С целью проверки указанного предположения проведены дополнительные триботехнические испытания со смазкой Литол-24 образцов, прошедших предварительную приработку в среде модифицированной смазки. Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют о сохранении высокой интенсивности изнашивания и низкого коэффициента трения у образцов, подвергнутых предварительной приработке в среде смазки, модифицированной УДАГ (рис. 4.20).

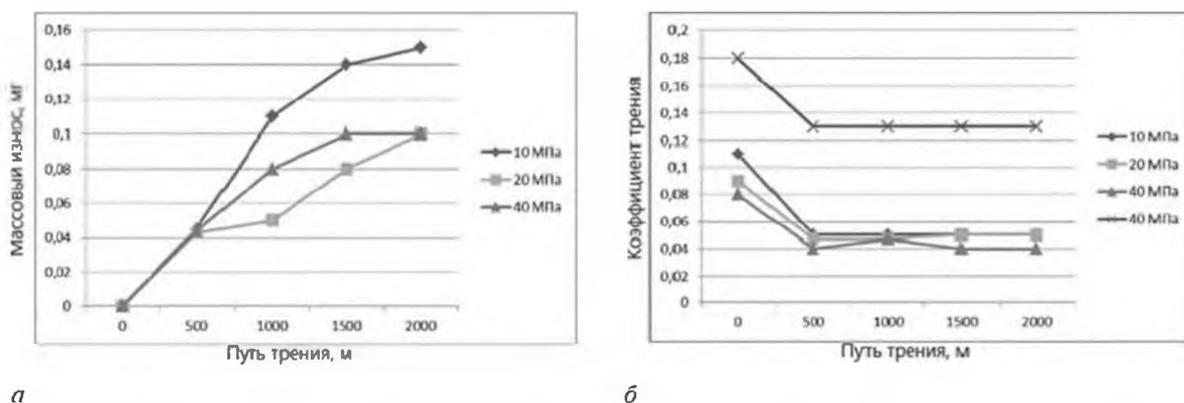


Рисунок 4.20 – Зависимость массового износа (а) коэффициента трения (б) бронзы БрБ2 от пути трения после приработки при различном контактном давлении:
 1, 2, 3 – приработка в комплексной литиевой смазке с УДАГ, 4– приработка в смазке Литол-24 стандартного состава

Таким образом установлено, что в условиях граничного трения пары «бронза – сталь» модифицирование смазочного материала добавками ультрадисперсной алмазографитовой шихты эффективно при давлениях свыше 20 МПа. При этом модифицированную смазку достаточно применять только на стадии приработки, поскольку использование после подобной приработки смазки Литол-24 обеспечивает низкий коэффициент трения ($f = 0,04-0,05$) при практически отсутствии износа.

Выводы.

1. Использование смазки, модифицированной добавками наноразмерных алмазов, перспективно для узлов трения, содержащих элементы с высокой прочностью и твердостью, как например сталь ШХ15. Варьируя типы смазки концентрацией модификатора в ней можно достигать более высокого уровня триботехнических свойств трибосопряжений, работающих в смазке с добавками наноразмерных алмазов.

2. Анализ полученных закономерностей показал, что из всех рассмотренных образцов максимальное снижение коэффициента трения и минимальная интенсивность изнашивания наблюдалось у образцов, работающих со смазкой, содержащей 0,45 % наноалмазов. В период приработки на длине пути до 100 м коэффициент трения снизился на 3,3 %, а в период установленного изнашивания было зафиксировано снижение коэффициента трения на 7,3 % с учетом качественных скачков при прохождении контрольных точек.

3. Полученные результаты исследований показывают, что при использовании смазки с наноразмерным алмазным компонентом снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания наблюдается на более ранних стадиях приработки. Можно предположить, что это происходит за счет упрочнения поверхностных слоев стали, их модифицирования частицами ультрадисперсных алмазов в процессе фрикционного

взаимодействия. Таким образом, можно рекомендовать применение базового масла с наноразмерными алмазами (~0,45 % НА) для повышения эффективности приработки двигателей внутреннего сгорания при их капитальном ремонте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обосновано возвращение среднего ремонта агрегатов в систему технического обслуживания и ремонта автомобилей с обоснованием заменяемого при нем комплекта деталей и предложены меры по упрочнению деталей, позволяющие достичь нормативной наработки.

Предложена технология диагностирования бензиновых двигателей внутреннего сгорания, которая уменьшает трудоемкость процесса в 1,8–2,0 раза за счет использования алгоритма поиска неисправностей двигателя с помощью мотортестера USB AUTOSCOPE IV с информационным обеспечением «CSS» и «Рх».

Обосновано влияние микроструктуры покрытий на интенсивность изнашивания и коэффициент трения восстановленных валов на основе анализа микроструктур и микротвердости покрытий, полученных наплавкой с использованием в качестве наплавочного материала порошка ПГ-19М-01 и износостойкого хромистого чугуна.

Установлено, что интенсивность изнашивания материала покрытия, восстановленных распределительных валов сопоставима с интенсивностью изнашивания новых или ниже в 1,2 раза. Требуемая интенсивность изнашивания обеспечена микроструктурой материала покрытия после наплавки, представляющей гетерогенную структуру, состоящую из карбидной матрицы и эвтектики (наплавка ИЧХ) и перенасыщенный α – твёрдый раствор Al и Fe в Cu; β – упорядоченный твёрдый раствор на основе соединения Cu_3Al (наплавка ПГ-19М-01).

На основании полученных экспериментальных исследований для восстановления стальных распределительных валов рекомендована газопорошковая наплавка кулачков порошком ПГ-19М-01 и дуговая наплавка шеек износостойким хромистым чугуном ИЧХ18, позволяющим получить покрытие с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения.

Разработан способ образования микрорельефа на внутренней поверхности гильзы цилиндра, который включает образование выступов поверхности оплавлением лазерным излучением с последующим хонингованием выступов микрорельефа до необходимой высоты.

Определены, с точки зрения максимизации гидродинамической несущей способности, шаго-высотные параметры микрорельефа, которые могут обеспечить минимальный, но достаточный зазор в сопряжениях цилиндропоршневых групп для обеспечения жидкостного трения.

Исследована износостойкость внутренней поверхности гильзы цилиндров. Для оценки износостойкости были проведены триботехнические испытания в три этапа на экспериментальных стендах в условиях, приближенных к реальным. В результате были получены как прямые, так и косвенные подтверждения эффективности микрорельефа на внутренней поверхности гильзы. При этом результаты представлены в виде графиков, которые в полной мере отражают преимущества износостойкости

поверхностей с нанесенным на них микрорельефом над аналогичными поверхностями без микрорельефа.

Установлено, что использование смазки, модифицированной добавками наноразмерных алмазов, перспективно для узлов трения, содержащих элементы с высокой прочностью и твердостью, как например сталь ШХ15. Варьируя типы смазки концентрацией модификатора в ней можно достигать более высокого уровня триботехнических свойств трибосопряжений, работающих в смазке с добавками наноразмерных алмазов.

Анализ полученных закономерностей показал, что из всех рассмотренных образцов максимальное снижение коэффициента трения и минимальная интенсивность изнашивания наблюдалось у образцов, работающих со смазкой, содержащей 0,45 % наноалмазов. В период приработки на длине пути до 100 м коэффициент трения снизился на 3,3 %, а в период установленного изнашивания было зафиксировано снижение коэффициента трения на 7,3 % с учетом качественных скачков при прохождении контрольных точек.

Полученные результаты исследований показывают, что при использовании смазки с наноразмерным алмазным компонентом снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания наблюдается на более ранних стадиях приработки. Можно предположить, что это происходит за счет упрочнения поверхностных слоев стали, их модифицирования частицами ультрадисперсных алмазов в процессе фрикционного взаимодействия. Таким образом, можно рекомендовать применение базового масла с наноразмерными алмазами (~0,45 % НА) для повышения эффективности приработки двигателей внутреннего сгорания при их капитальном ремонте.

Список использованных источников.

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 280 с.
2. Астапчик, С.А. Исследование износостойкости упроченных пар трения скольжения / С.А. Астапчик [и др.] // Трение и износ. – Минск, 1997. – Т. 18 – С. 229–234.
3. Асташкевич, Б.М. Повышение износостойкости деталей двигателей внутреннего сгорания / Б.М. Асташкевич [и др.]; под ред. М.М. Хруцова. – М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.
4. Богданович, П.Н. Трение, смазка и износ в машинах: учебник / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск: Тэхналогія, 2011. – 527 с.
5. Иванов, В.П. Источники экономической эффективности ремонтно-восстановительного производства / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Труды ГОСНИТИ. – М.: ГОСНИТИ, 2018. – Том 130. – С. 265–270.
6. Кострицкий, В.В. Сокращение трудоемкости диагностирования бензиновых двигателей внутреннего сгорания при помощи программ-анализаторов. / В.В. Кострицкий, А.В. Павченко, Д.С. Шевченко // Вестник ПГУ. Транспорт: Новополоцк, 2020г. С.110-117
7. Бурумкулов, Ф.Х. Оценка триботехнических характеристик коленчатых валов, восстановленных установкой полуколец / Ф.Х. Бурумкулов, В.Е. Блох // Труды ГОСНИТИ / ГОСНИТИ. – Москва, 1992. – Том 92: Восстановление деталей и техническое обслуживание машин, используемых в сельском хозяйстве. – С. 3 – 25.
8. Кострицкий, В.В. Повышение эффективности диагностирования бензинового двигателя по осциллограмме давления в цилиндре / В.В. Кострицкий, В.А. Фруцкий // Интеллектуальные машинные технологии и техника в сельском хозяйстве. Сборник материалов международной научно-технической конференции, федерального государственного бюджетного научное учреждение, федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. (Москва, 12-13 декабря 2017г). ТрудыГОСНИТИтом 128 – 2017. С. 56–61
9. Влияние покрытий и их дислокационной структуры на механические свойства и внутреннее трение твердых тел/ В.Ф Шатинский [и др.] / Свойства конструкционных материалов при воздействии рабочих сред. – Киев: Наукова думка, 1980. –276 с.
10. Воловик, Е.Л. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л. Воловик. – М.: Колос, 1981. – 351 с.
11. Иванов, В.П. Восстановление коленчатых валов автомобильных двигателей / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина. – Palmarium Academic Publishing, 2019. – 210 с

12. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 133 с.
13. Восстановление и упрочнение деталей машин с помощью новых износостойких материалов. Обзорная информация. М.: АгроНИИТЭИИТО. 1990. – 64 с.
14. Кострицкий, В.В. Сокращение трудоемкости диагностирования бензиновых двигателей внутреннего сгорания при помощи программ-анализаторов. / В.В. Кострицкий, А.В. Павченко, Д.С. Шевченко // Вестник ПГУ. Транспорт: Новополоцк, 2020г. С.110-117
15. Иванов, В.П. Деформации коленчатых валов при их восстановлении с использованием наплавки / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Технический сервис машин, 2019. – № т.5 (137). – С. 48–56.
16. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: учебник / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
17. Гужвенко И.Н, Чанчиков В.А., Перекрестов А.П., Свекольников С.А., Бурмистрова О.В. Исследование влияния дисперсности слоистых модификаторов трения на противоизносные свойства смазочных материалов, 2016. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru>. – Дата доступа: 20.01.2018.
18. Иванов, В.П. Белорусский опыт восстановления деталей автомобилей и специальной строительной техники / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина // Строительство. Экономика и управление: ежеквартальный научный, производственно-экономический журнал – № 3(39) сентябрь 2020. – С. 32–42.
19. Гурвич, И.Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей / И.Б. Гурвич, П.Э. Сыркин. – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
20. Гуша А.А, Дудан А.В., Жорник И.В. Повышение ресурса узлов трения модифицированием смазочного материала наноразмерными алмазами/Вестник Брестского государственного технического университета. 2015. №4. – С.15– 18. – Режим доступа: <http://www.bstu.by>. – Дата доступа: 20.12.2017.
21. Дорожкин, Н.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин / Н.Н. Дорожкин, В.Н. Гимельфарб. – Минск: Ураджай, 1987. – 140 с.
22. Pilipenko S.V. Influence of the Wall Thickness Value on the Cross Wall Thickness Deviation of Tubes Rolled on the Tube Rolling Plant with the Continuous Mill/S. V. Pilipenko, P. V. Drozhzha, E. A. Limonchenko// Journal of engineering sciences, №1 -2018- сA8-A11 (DOI: 10.21272/jes.2018.5(1).a2).
23. Фруцкий В.А., Вигерина Т.В., Кострицкий В.В. Восстановление вкладышей коленчатого вала // Вестн.Полоц. гос.ун-та. Сер.В. промышленность. Прикладные науки.- 2018г. Серия В.№3.-С.34-37

24. Дуб С.Н., Ковальчук А.Н., Глушкова Д.Б. Повышение износостойкости трущихся поверхностей пар трения/ Сборник научных трудов/«Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета», 2009. – Режим доступа:<https://cyberleninka.ru>. – Режим доступа:20.12.2017.
25. Дудан А.В., Гуца А.А. Модифицирование поверхностей трения наноразмерными алмазосодержащими добавками//[Иновационные технологии в машиностроении:электрон. сборник материалов. Научные конференции и семинары ПГУ. Новополоцк,2015г.](#)/Полоц. гос. ун-т;. – Новополоцк, 2015.– Режим доступа:<http://elib.psu.by>. – Дата доступа: 20.12.2017.
26. Дунаев А.В. Особенности трибопроцессов с участием минеральных модификаторов поверхностей трения / Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: НЗ4 материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 16–17 окт. 2013 г.). В 3 т. Т. 3. / Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2014.– С. 214 – 220.
27. Дубняков, В.И. Повышение износостойкости трущихся поверхностей лазерным упрочнением / В.И. Дубняков, С.П. Козырев, Н.Л. Пимков // Трение и износ, 1984. – т. 5. – № 4. – С. 713–717.
28. Жорник В.И., Ивахник А.В., Ивахник В. П. Пластичные смазочные материалы, модифицированные наноразмерными добавками / Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь – Россия – Украина (НАНО-2014): материалы IV Междунар. науч. конф. (Минск, 7–10 окт. 2014 г.).– Минск,2014. – С. 151 -152.
29. Ивашко, В.С. Моделирование процесса микроплазменной обработки деталей с нанесением порошковых материалов / В.С.Ивашко, П.А. Декевич // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации: сборник науч. трудов VI Межд. науч-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апреля 2007 г.: в 3 т. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: П.А. Витязь, С.А. Астапчик. – Новополоцк, 2009. – Т. 3. – С. 202–205.
30. Ильющенко, А.Ф. Новые порошковые и композиционные материалы / А.Ф. Ильющенко, Е.Е. Петюшик, В.В. Савич // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации: сборник науч. трудов VI Межд. науч-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апреля 2009 г.: в 3 т. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: П.А. Витязь, С.А. Астапчик. – Новополоцк, 2009. – Т. 1. – С. 11–23.
31. Исследование износостойкости восстановленных коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания. / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: темат. сб. – Новополоцк, 1997. – С. 135–136.

32. Кастрюк А.П., Иванов В.П. Техничко-экономические модели способов восстановления валов, стержней и подшипников скольжения/Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 16–17 окт. 2013 г.). В 3 т. Т. 3. / Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2014. – С. 208-214.
33. Колбашов М.А., Моисеев Ю.Н., Маслов А.В. Изучение триботехнических свойств моторных масел с присадками жидких кристаллов. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru>. – Дата доступа: 10.01.2018.
34. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
35. Кузнецов, Ю.А. Улучшение противоизносных свойств покрытий, полученных газодинамическим напылением / Ю.А. Кузнецов // Научные проблемы и перспективы развития, ремонта, обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей: материалы Междунар. научно-техн. конф., Москва, 4–8 окт. 2004 г. / ГНУ ГОСНИТИ. – Москва, 2004. – С. 26–29.
36. Дудан А.В. Инновационные технологии восстановления штоков гидроцилиндров / А.В.Дудан, А.П.Ялович, М.А.Белоцерковский. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет, 2020г. – 232с.
37. Кускова Н.И. Триботехнические характеристики наноуглеродных материалов.– Режим доступа:<https://cyberleninka.ru>.– Датадоступа : 10.01.2018.
38. Лавринович, М.Ф. Повышение износостойкости деталей автомобилей / М.Ф. Лавринович, М.М. Шустерняк. – Минск: Беларусь, 1985. – 142 с.
39. Лялякин, В.П. Методы повышения ресурса деталей дизельных двигателей при их восстановлении: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.20.03 / В.П. Лялякин; ГНУ ГОСНИТИ. – М., 1996. – 36 с.
40. Веремей Г. А. Обеспечение точности при восстановлении сёдел клапанов в авторемонтном производстве/ Г. А. Веремей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Полоцк: ПГУ. – 2021. – № 3 (43). – С. 33-41.
41. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками/П.А. Витязь[и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 527 с.
42. Петряков, В.К. Совершенствование технологии ремонта стальных тракторных коленчатых валов / В.К. Петряков, М.В. Скорбов, С.Н. Левушкин // Техника в сельском хозяйстве. – 2005. – № 4. – С. 38–39.
43. Польцер, Г., Фирковский, А. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос //

- Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1990. – Т. 5. – С. 85–122.
44. Повышение износостойкости трущихся поверхностей пар трения / А.Н. Ковальчук, Д.Б. Глушкова / Сборник научных трудов/«Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета», 2009 г.– Режим доступа :<https://cyberleninka.ru>. – Дата доступа : 20.01.2018.
 45. Повышение ресурса узлов трения модифицированием смазочного материала наноразмерными алмазами/ Гуца А.А, Дудан А.В., Жорник И.В./Вестник Брестского государственного технического университета.2015. №4, стр.15 -18 – Режимдоступа :<http://www.bstu.by>. – Датадоступа : 20.12.2017.
 46. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся порошки и износостойкие покрытия из них / Ф.И. Пантелеенко, С.Н. Любецкий. – Минск: БелНИИТИ, 1991. – 57 с.
 47. Потеха А.В.Влияние технологической и эксплуатационной наследственности на изнашивание прецизионных узлов трения / Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы VI Междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 4–5 мая 2006г. – С. 51-54.– Режим доступа :<https://elib.gstu.by>.– Дата доступа : 10.01.2018.
 48. Системный анализ технологии формирования износостойких покрытий на поверхностях трения деталей / Л.Б.Леонтьев, А.Л.Леонтьев, В.Н.Макаров// Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12 (часть4)– С. 729-734.
 49. Сороговец, В.И. Получение износостойких покрытий плазменной наплавкой диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. / В.И. Сороговец; ПГУ. – Новополоцк, 2001. – 23 с.
 50. Справочник по триботехнике: в 2 т.; под ред. И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1989 т. 2. – 312 с.
 51. Справочник по триботехнике: в 3 т; под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения. – 416 с.
 52. Суранов, Г.И. Уменьшение износа автомобильных двигателей при пуске / Г.И. Суранов. – М.: Колос, 1982. – 143 с.
 53. Улучшение триботехнических характеристик подвижных сопряжений в моторных маслах/ А.А.Болденко, В.Г.Лаптева, В.Ф.Пичугин// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 4. – Режим доступа:<http://naukarus.com>.– Датадоступа : 20.01.2018.
 54. Флыс, И.М. Технология ремонта разномарочных тракторных двигателей в едином технологическом потоке: автореф. дис. канд. техн. наук:

- 05.20.03. / И.М. Флыс; Украинская сельскохозяйственная академия. – Киев, 1991. – 16 с.
55. Хилько, Д.Н. Повышение эффективности упрочнения и восстановления деталей машин наплавкой в электромагнитном поле: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Д.Н. Хилько; Физ.-тех. ин-т НАН Б. – Минск, 2001. – 21 с.
 56. Черноиванов, В.И. Организация и технология восстановления деталей машин / В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин. – М.: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с.
 57. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
 58. Pavelescu D. – Tribologia – o stiinta a calitatii si durabilitatii masinilor. Revista "Stiinta si Tehnica" nr. 7, Bucuresti 1986.
 59. Methods of Tribological Improves and Testing of Piston Engines, Compressors and Pumps/R.Pešić, A.Davinić, S. Veinović// Tribology in industry, Volume 27, No. 1&2. – 2005. – Режимдоступа:<http://www.tribology.fink.rs>. – Датадоступа: 20.01.2018.
 60. Tribologia. Tribotechnika / Redakcja naukova, M. Szczerek, M. Wisniewsky. Radom: Polskie Towarzystwo Tribologiczne, 2000. 728 s.
 61. Власов, В.М. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей / В.М. Власов, С. В. Жанказиев, С. М. Круглов [и др.]. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 480 с.
 62. Молодык, Н. В., Восстановление деталей машин / Н. В. Молодык, А.С.Зенкин — М.: Машиностроение, 1989. — 480 с. (Справочники для рабочих)
 63. Шадричев, В. А. Основы технологии автостроения и ремонт автомобилей / В. Л. Шадричев.– Л.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
 64. Новиков, А. Н. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочненного слоя, нанесенного микродуговым оксидированием на алюминиевую деталь / А. Н. Новиков, Ю. А. Кузнецов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – №2. – С. 27–28
 65. Новиков, А. Н. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами: Дис. ... д-ра. техн. наук: / А.Н. Новиков – М., 1999. – 346 с
 66. Бурумкулов, Ф.Х. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенин [и др]; – МГУ им. Н.П.Огарева. – Саранск: Тип. «Красный Октябрь», 2003. – 504 с.
 67. Бурумкулов, Ф. Х. Восстановление и упрочнение деталей электроискровым методом / Ф. Х. Бурумкулов, А. В. Беляков, Л. М. Лельчук, [и др] // Сварочное производство.– 1998.– № 2.– 192с.

68. Глазков, Ю. Е. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин наплавкой : метод. указания / Ю. Е. Глазков, А. И. Попов. – Тамбов : Тамбовский гос. тех. ун-т, 2004. – 13с.
69. Богданович, П.Н. Трение, смазка и износ в машинах: учебник / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск: Тэхналогія, 2011. – 527 с.
70. Булавин, В.А. Оптимизация процесса повышения износостойкости деталей машин / В.А. Булавин [и др.] // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1994. – № 3. – С. 70–72.
71. Бурумкулов, Ф.Х. Оценка триботехнических характеристик коленчатых валов, восстановленных установкой полуколец / Ф.Х. Бурумкулов, В.Е. Блох // Труды ГОСНИТИ / ГОСНИТИ. – Москва, 1992. – Том 92 – 550с.
72. Влияние покрытий и их дислокационной структуры на механические свойства и внутреннее трение твердых тел / В.Ф. Шатинский [и др.] / Свойства конструкционных материалов при воздействии рабочих сред. – Киев: Наукова думка, 1980. – 276 с.
73. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: учебник / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
74. Ильющенко, А.Ф. Новые порошковые и композиционные материалы / А.Ф. Ильющенко, Е.Е. Петюшик, В.В. Савич // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации: сборник науч. трудов VI Межд. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апреля 2009 г.: в 3 т. / ПГУ; редкол.: П.А. Витязь, С.А. Астапчик. – Новополоцк, 2009. – Т. 1. – 260с.
75. Кузнецов, Ю.А. Улучшение противоизносных свойств покрытий, полученных газодинамическим напылением / Ю.А. Кузнецов // Научные проблемы и перспективы развития, ремонта, обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей: материалы Междунар. научно-техн. конф., Москва, 4–8 окт. 2004 г. / ГНУ ГОСНИТИ. – Москва, 2004. – 352с.
76. Лавринович, М.Ф. Повышение износостойкости деталей автомобилей / М.Ф. Лавринович, М.М. Шустерняк. – Минск: Беларусь, 1985. – 142 с.
77. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся порошки и износостойкие покрытия из них / Ф.И. Пантелеенко, С.Н. Любецкий. – Минск: БелНИИНТИ, 1991. – 57 с.