

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный технический университет
им. Ю.А. Гагарина»

А.С. Денисов, А.Р. Асоян, Ю.В. Родионов

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ
ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Пенза 2015

УДК 621.431:629.3.083(035.3)

ББК 39.35-08

ДЗЗ

Рецензент – зав. кафедрой «Транспортные машины»
доктор технических наук, профессор
В.В. Салмин (ПГУ)

Денисов А.С.

ДЗЗ **Обеспечение работоспособности автомобильных двигателей совершенствованием восстановительных технологий: моногр. / А.С. Денисов, А.Р. Асоян, Ю.В. Родионов. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 248 с.**

ISBN 978-5-9282-1314-5

Изложены теоретические основы и результаты исследований физико-химических процессов формирования металлопокрытий при восстановлении деталей двигателей. Предложены мероприятия по совершенствованию технологических процессов восстановления основных элементов двигателя по техническому состоянию, даны практические рекомендации и технико-экономическая оценка эффективности результатов исследований.

Монография подготовлена на кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта» и предназначена для специалистов автотранспортного комплекса, студентов, обучающихся по направлениям подготовки 23.03.03. и 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

ISBN 978-5-9282-1314-5

- © Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2015
- © Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 2015
- © Денисов А.С., Асоян А.Р., Родионов Ю.В. 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Согласно требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки 23.03.03 (190600.62) – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (квалификация (степень) «бакалавр»), выпускник должен, в частности, овладеть следующими профессиональными компетенциями:

– уметь разрабатывать техническую документацию и методические материалы, предложения и мероприятия по осуществлению технологических процессов эксплуатации, ремонта и сервисного обслуживания транспортных и транспортно-технологических машин различного назначения, их агрегатов, систем и элементов (ПК-3);

– владеть умением изучать и анализировать необходимую информацию, технические данные, показатели и результаты работы по совершенствованию технологических процессов эксплуатации, ремонта и сервисного обслуживания транспортных и транспортно-технологических машин различного назначения, их агрегатов, систем и элементов, проводить необходимые расчеты, используя современные технические средства (ПК-21);

– использовать методы принятия решений о рациональных формах поддержания и восстановления работоспособности транспортных и технологических машин и оборудования (ПК-36);

– использовать технологии текущего ремонта и технического обслуживания с использованием новых материалов и средств диагностики (ПК-38).

Целью данной работы является обобщение теоретического и практического материала, полученного в результате экспериментов, проведенных под руководством авторов в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства и Саратовском государственном техническом университете им. Ю.А. Гагарина.

Авторы будут благодарны за возможные замечания и предложения и просят направлять свои отзывы и пожелания по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Г. Титова, 28, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, кафедра «Эксплуатация автомобильного транспорта». Тел. (8412) 49-83-30, факс (8412) 49-72-77, E-mail: dekauto@pguas.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобилестроение – одна из ведущих отраслей машиностроительного комплекса – является системообразующим элементом экономики, влияющим на уровень и качество жизни. Развитие грузового автомобильного транспорта оказывает существенное влияние на деятельность всех отраслей экономики страны, обеспечивая перевозки в перерабатывающей промышленности, сельском хозяйстве, торговле и других отраслях.

В то же время доля транспортных издержек в России довольно высока. Для членства в ВТО необходимо существенно повысить конкурентоспособность товаров и услуг, как за счет повышения их качества, так и за счет снижения цены. Одним из важнейших показателей конкурентоспособности автомобилей, в соответствии со стандартами ИСО 9000, является соотношение затрат на обеспечение работоспособности за весь срок эксплуатации к затратам на изготовление. В развитых европейских странах, в Америке это соотношение составляет в среднем 120%, в то время как в России это более 400%, что и обуславливает проблемную ситуацию.

Транспортной стратегией России, которая определяет направление развития транспортной системы, основные задачи, формы и содержание деятельности государства в транспортной сфере на период до 2025 года, предусмотрено совершенствование транспортных технологий и транспортной техники.

Как сказано в транспортной стратегии России [290]: «Государство должно в первую очередь поддерживать те программы в отраслях транспортного машиностроения, которые, наряду с производством транспортной техники, предусматривают эффективные коммерческие схемы её продвижения на рынок, а также сопровождения на всем жизненном цикле (индустриальная модернизация, техническое обслуживание и ремонт транспортных средств и оборудования, находящихся в эксплуатации)».

В настоящее время увеличивается потребность в тяжелых грузовых автомобилях [61]. В целях повышения конкурентоспособности отечественного грузового автомобилестроения ОАО «КАМАЗ» проводит расширение модельного ряда автомобилей, предлагается более 20 базовых моделей. На рынок выходят как среднетоннажные (КамАЗ – 4308), так и тяжелые

автомобили (семейство 6520), седельные тягачи (семейства 5460 и 6460), полноприводные самосвалы (6522), автобусы НЕФАЗ, спецтехника на базе автомобилей КамАЗ [274].

Система обеспечения работоспособности силовых агрегатов автомобилей основывается на закономерностях изменения их технического состояния в процессе эксплуатации. Эти закономерности зависят от групп факторов [124] (рис. В1).

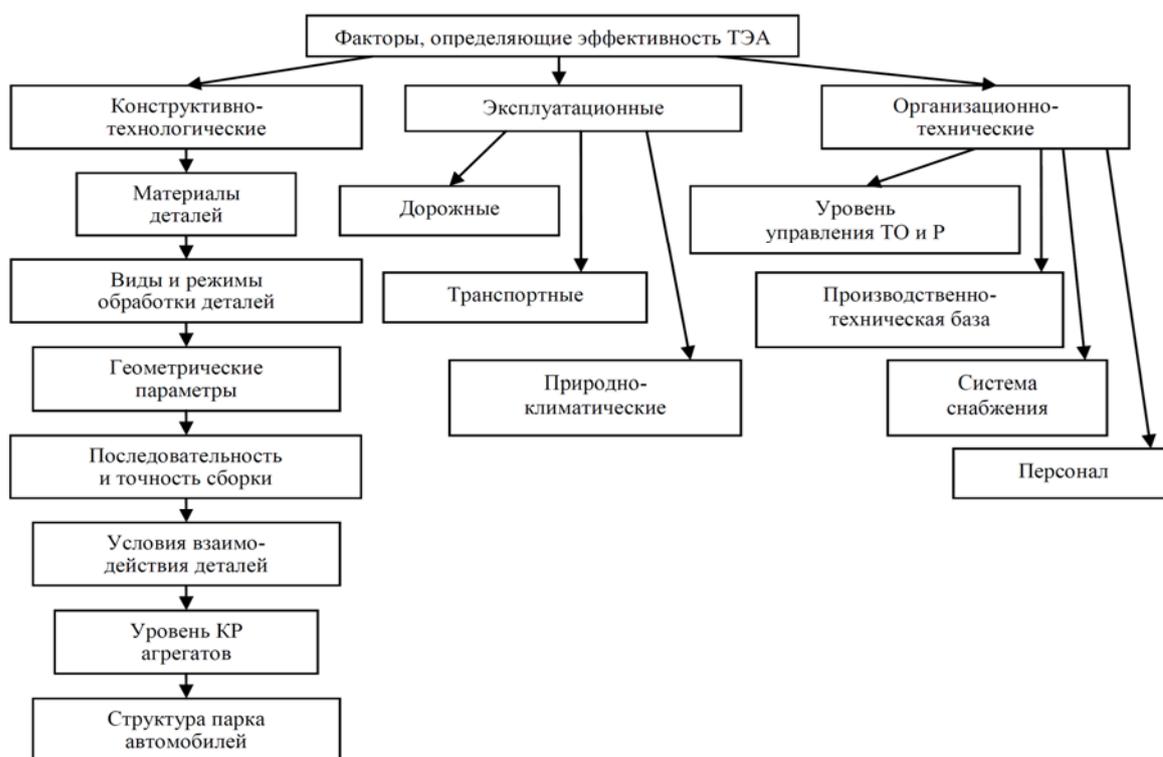


Рис. В1. Схема факторов, определяющих эффективность технической эксплуатации автомобилей

Как видно из схемы, основными элементами, определяющими эффективность технической эксплуатации автомобилей (ТЭА), являются конструктивно-технологические факторы, которые в значительной степени влияют на качество выпускаемых агрегатов и автомобиля в целом.

Общепризнана существующая острая проблема качества в автомобилестроении России. Отечественное автомобилестроение для достижения уровня развитых стран, особенно в области долговечности и экологической безопасности, имеет существенный резерв [300, 301, 302].

Около 60% всех рекламаций в гарантийный период обусловлены несовершенством конструкторско-технологической разработки и процесса производства. Поэтому, для обеспечения надежности автомобиля, задачи, связанные с качеством выпускаемого изделия, необходимо решать в процессе проектирования и изготовления изделия, а проявляться оно будет в процессе эксплуатации автомобиля [292].

Достижение высоких показателей по экологическим нормам дизелей, по показателям функционирования и долговечности неразрывно связано с повышением качества изготовления деталей, восстановления их при ремонте, применением новых технологий и материалов.

Одним из основных элементов автомобиля, от которого во многом зависит его эффективность, является силовой агрегат (двигатель). Проводя индустриальную модернизацию автомобилей КАМАЗ, ОАО «КАМАЗ» производит формирование и выпуск модельного ряда современного семейства двигателей, соответствующих экологическим стандартам ЕЭК ООН EURO – 1, EURO – 2, EURO – 3 и EURO – 4.

Модернизация началась с двигателя модели 740.10 (мощность 210 л.с., номинальная частота вращения коленчатого вала 2600 мин⁻¹, максимальный крутящий момент 850 Нм). Создан двигатель модели 740.11.240, отвечающий требованиям EURO – 1 (мощность 240 л.с., номинальная частота вращения коленчатого вала 2200 мин⁻¹, максимальный крутящий момент 850 Нм). Затем начался выпуск двигателей, отвечающих EURO – 2. Это – двигатели 740.30-260, 740.50-360, созданные на базе двигателей 740.11.240. Следующим этапом модернизации современного семейства двигателей стал выпуск силовых агрегатов, соответствующих требованиям EURO – 4.

Увеличение мощности двигателя более чем в 1,5 раза относительно базового (табл. В1) [7], без значительного изменения размеров его основных деталей (коленчатый вал, шатун, блок цилиндров и др.), повлияло на долговечность и конкурентоспособность силового агрегата. При этом все актуальнее стоит вопрос сокращения издержек на всем жизненном цикле автомобиля, что заставляет внимательно изучать зарубежный опыт.

Т а б л и ц а В 1

Характеристика двигателей

Наименование параметра, единица измерения	Модель двигателя				
	КамАЗ- 740.10	КамАЗ - 740.11- 240	КамАЗ - 740.13- 260	КамАЗ - 740.30	КамАЗ - 740.50
Номинальная мощность, кВт (л.с.)	154 (210)	176 (240)	191 (260)	191 (260)	265 (360)
Давление масла, кПа (кгс/см ²)	195-388 (3,5-4)	392-539 (4-5,5)	392-539 (4-5,5)	392-539 (4-5,5)	392-539 (4-5,5)
Максимальный крутящий момент, Н·м (кгс·м)	667 (68)	833 (85)	931 (95)	1079 (110)	1470 (150)
Диаметр цилиндра, мм	120	120	120	120	120
Ход поршня, мм	120	120	120	120	130

Несмотря на тенденцию к обновлению парка автомобилей, средний возраст автомобилей значителен. Доля автомобилей марки «КАМАЗ» старше 15 лет также значительна и составляет более 60% их парка [306].

Форсирование силовых агрегатов автомобилей КАМАЗ и совершенствование их конструкции и технологии изготовления изменили их надежность.

Надежность автомобиля является одним из основных комплексных показателей, характеризующих изменения его качества в процессе наработки. Анализ распределения отказов по элементам двигателя КАМАЗ позволяет выявить наименее надежные элементы автомобиля с целью их дальнейшего конструктивно-технологического усовершенствования, обосновать расход запасных частей в конкретных условиях эксплуатации, установить рациональные нормативы технического обслуживания и ремонта (рис. В2).

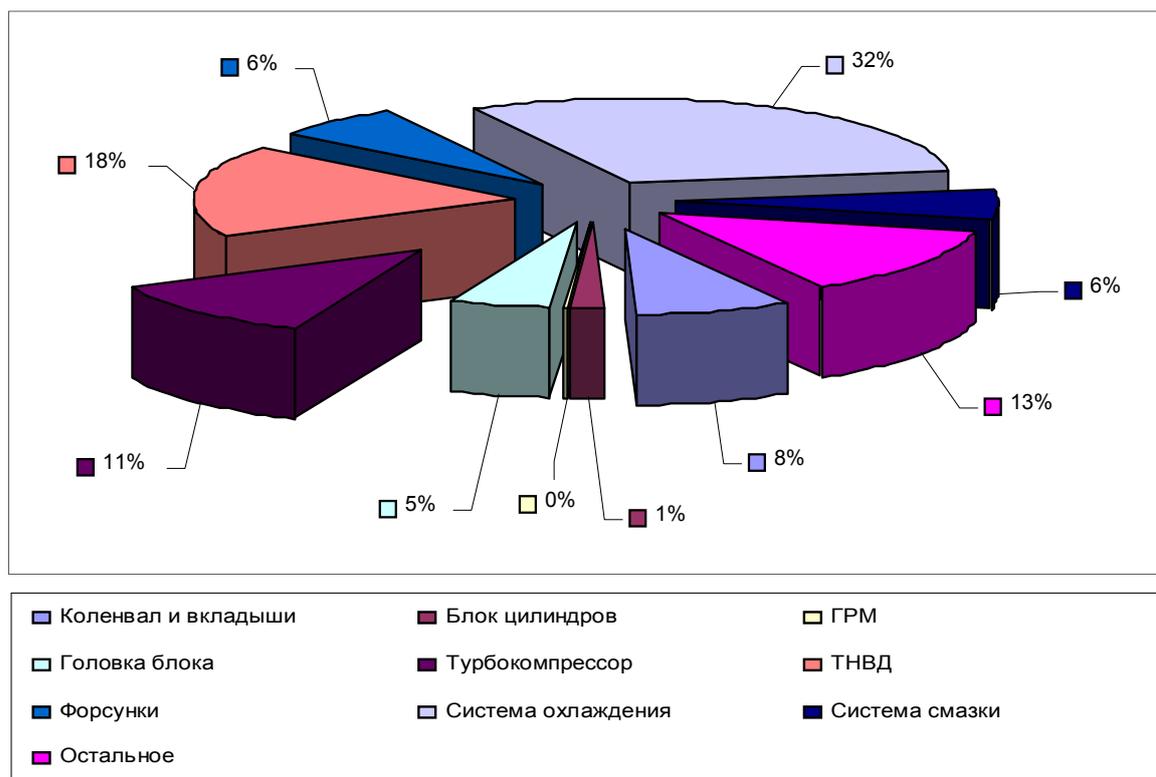


Рис. В2. Распределение отказов по элементам двигателя КамАЗ, собранных за период 2005-2006 гг. в условиях ООО «Саратовский автоцентр КАМАЗ»

Обслуживание и ремонт автомобилей опираются на положения теории трения, смазки, износа и старения их элементов. Приоритет в этой области принадлежит российским ученым и инженерам. основоположниками гидродинамической теории смазки были академик С.А. Чаплыгин, профессора Н.П. Петров, Н.Е. Жуковский, Н.И. Мерцалов и другие, труды которых легли в основу многих исследований по износу и ремонту машин, механизмов, сельскохозяйственной техники. Большой вклад в развитие науки о трении и износе внесли профессора В.Д. Кузнецов, Б.И. Костецкий, И.В. Крагельский, М.М. Хрущев и другие. Вопросы изучения трения с применением

износостойких масел с различными присадками рассмотрены Г.В. Виноградовым, трения при граничных условиях смазки – Б.В. Дерягиным, А.С. Ахматовым, сухого трения – И.В. Крагельским и др. Научные положения в технологии ремонта и восстановлении деталей машин также принадлежат отечественным ученым и изобретателям: инженерам Н.Г. Славянову и Н.Н. Бернадосу – основоположникам электродуговой сварки; академику Б.С. Якоби – основоположнику электролитического осаждения металлов; академику Е.О. Патону – автору автоматизации сварочных процессов, Г.П. Клековкину – автору вибродуговой наплавки и т.д. Благодаря большой исследовательской работе российских ученых В.И. Казарцева, В.В. Ефремова и других многие вопросы ремонта и эксплуатации машин получили теоретическое обоснование, используя которое, удалось решить ряд сложных практических проблем в области эксплуатации и технологии восстановления деталей машин и механизмов, повышая при этом качество автомобиля в целом.

Качество автомобиля характеризуется не только способностью выполнять заданные функции, но и, главным образом, уровнем надежности, свойством длительно сохранять и, если необходимо, восстанавливать свою работоспособность при минимальных затратах труда и денежных средств. Таким образом, долговечность представляет собой характеристику качества, отнесенную ко времени. Если же в процессе эксплуатации агрегата происходит частичная или полная утрата его свойств, приводящих к невозможности выполнения агрегатом определенных функций, это приводит к частичному или полному выходу автомобиля из строя.

Снижение долговечности элементов, агрегата и т.д. обусловлено несколькими факторами:

1) ошибки, допущенные при конструировании, изготовлении и монтаже, обычно проявляются в ранний период эксплуатации;

2) постепенное утрачивание элементом, агрегатом ряда функциональных свойств, то есть износ. Этот процесс закономерен и с увеличением времени эксплуатации автомобиля износ в рабочих сопряжениях возрастает. Однако сам результат закономерных изменений проявляется внезапно. В связи с этим процесс износа происходит под влиянием постоянно действующих факторов, имеющих и случайный, и детерминированный характер. В этом и состоит влияние условий эксплуатации. Однако естественное завершение процесса изнашивания имеет случайный характер;

3) воздействия физического характера, приводящие к внезапным отказам элемента, агрегата, даже при отсутствии у элемента, агрегата видимых ухудшений функциональных свойств.

Все виды отказов и виды причин, их вызвавших, объединяет один общий признак: случайность возникновения даже при постепенном накоплении физических изменений.

Поэтому основная и важнейшая задача при эксплуатации автомобильного транспорта – полное использование надежности машины в процессе ее эксплуатации, а при ремонте – качественное и недорогое восстановление долговечности до оптимального уровня, обеспечивающего наименьшую удельную стоимость единицы наработки машины между ремонтами. Достигнуть высокого технико-экономического эффекта предприятия возможно, используя оптимальные организационные и технологические формы поддержания и восстановления работоспособности машин, систематически контролируя и повышая качество их ремонта и технического обслуживания. Поэтому проблема совершенствования эксплуатационно-ремонтных циклов силовых агрегатов (двигателей) и технологических процессов восстановления их основных деталей является актуальной и от ее решения зависят долговечность автомобилей и уровень затрат на поддержание их работоспособности.

Настоящая работа посвящена обоснованию технологических методов и средств повышения долговечности основных элементов двигателей, а также реализации положительных решений, полученных при исследованиях.

Цель работы – повышение долговечности автомобильных двигателей и снижение затрат на обеспечение их работоспособности, путем совершенствования технологических процессов восстановления основных деталей двигателей по их техническому состоянию.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ изменения технического состояния силовых агрегатов в процессе эксплуатации

От начала эксплуатации и до списания автомобиль выполняет большой объем полезной работы при непрерывном воздействии на него неблагоприятных внешних и внутренних факторов, поэтому его техническое состояние неизбежно ухудшается.

Оптимизировать изменение технического состояния силовых агрегатов в процессе эксплуатации можно при обосновании зависимостей изменения технического состояния двигателей от пробега автомобиля с начала эксплуатации и критерия предельного состояния основных сопряжений двигателя, которые позволят определить оптимальный пробег автомобиля до текущего, капитального ремонта. Данные зависимости дают возможность прогнозировать изменение технического состояния двигателей. Так как эти изменения являются следствием процессов изнашивания сопряжений, необходимо определить зависимость износа основных деталей двигателей от пробега автомобиля [2].

Как уже определили, основными причинами изменения технического состояния силовых агрегатов являются изнашивание, усталостные, тепловые и коррозионные разрушения [179], которые зависят от интенсивности изменения размеров, геометрической формы деталей и их взаимного расположения.

Изнашивание происходит под влиянием трех групп факторов: конструктивных – зависят от конструкции двигателя, технологических – от технологии изготовления деталей и эксплуатационных – качества применяемых топлив и масел, условий эксплуатации. Зная долю износов, вызванных различными условиями эксплуатации двигателя в общем износе, можно определить факторы, оказывающие основное влияние на износ деталей. Это позволяет выявить наиболее эффективные пути повышения долговечности двигателей при малой затрате времени и средств, а также прогнозировать ресурс двигателей до капитального ремонта в зависимости от условий эксплуатации [124]. Поэтому работа по повышению износостойкости может дать максимальный технико-экономический эффект в том случае, если конструктивные разработки будут в первую очередь направлены на устранение факторов, вызывающих максимальный износ.

Различные эксплуатационные факторы, влияющие на износ деталей двигателя и его работоспособность, в процессе эксплуатации принято делить на три группы [2, 123]:

1. Нагрузочные и скоростные режимы работы двигателей, которые в основном определяют величину молекулярно-механического (адгезионного) изнашивания.

2. Тепловой режим работы двигателя, включая периоды пуска и прогрева, которые определяют величину коррозионно-механического и молекулярно-механического изнашивания.

3. Запыленность воздуха и защита двигателя, его отдельных деталей от механических частиц загрязнений, определяющих величину абразивно-механического изнашивания.

Приведенное деление до некоторой степени условно, так как износ почти каждой детали двигателя является суммой воздействия всех трех факторов. Вместе с тем каждый из приведенных разделов соответствует вполне определенному комплексу конструктивных мероприятий, направленных на повышение износостойкости деталей двигателя, и отражает основные тенденции, сложившиеся к настоящему времени при изучении и анализе изнашивания деталей [119].

В зависимости от условий эксплуатации среднее тяговое усилие автомобиля изменяется в широких пределах. Это ведет к пропорциональному увеличению нагрузки на двигатель.

С форсированием двигателей, повышением крутящего момента, растет нагрузка на его элементы, что приводит к сближению трущихся поверхностей деталей и повышает вероятность контакта их микровыступов.

Это подтверждается и исследованиями влияния нагрузочного режима двигателя на износ деталей [6].

Скоростной режим работы двигателя зависит от интенсивности движения, состояния дорожного покрытия и рельефа местности. С увеличением скоростного режима возрастает температура деталей двигателя, что ухудшает условия смазки и повышает интенсивность изнашивания. Однако повышение скорости вращения коленчатого вала двигателя сопровождается снижением пути трения, который характеризуется количеством оборотов коленчатого вала на единицу пути автомобиля. Поэтому с повышением скоростного режима двигателя сокращается путь трения и при постоянном температурном режиме должна уменьшаться интенсивность изнашивания.

Интенсивность изнашивания деталей двигателя больше также и на неустановившихся скоростных режимах, чем при постоянной скорости вращения коленчатого вала. Причем с увеличением ускорения темп роста интенсивности изнашивания снижается [6].

Тепловой режим работы двигателя, который оценивается по температуре охлаждающей жидкости и масла, зависит как от температуры окружающего воздуха, скорости и направления ветра, условий охлаждения, так и от нагрузочного и скоростного режимов. Он оказывает большое влияние на износ не только из-за коррозионно-механического изнашивания, но главным образом из-за загрязнения при пониженном тепловом режиме,

образования отложений на деталях. При низких тепловых режимах проникшая в масло и сконденсировавшаяся вода вызывает интенсивную коагуляцию примесей и гидролиз присадок с образованием осадков – шламов. Последние приводят к быстрому выходу из строя масляных фильтров, загрязнению сетки маслоприемников насосов и масляных каналов, что может резко снизить безотказность работы двигателя и вызвать повышенное изнашивание деталей до аварийного. При высоких тепловых режимах работы двигателя интенсифицируются процессы окисления масла, приводящие к ухудшению его свойств, срабатыванию присадок, особенно щелочных.

1.1.1. Изнашивание деталей

Долговечность автомобилей и их элементов обусловлена процессами, происходящими в сопряженных поверхностях.

С целью обоснования и развития зависимостей показателей технического состояния, основных деталей форсированных двигателей от наработки необходимо исследовать изменение размеров и формы деталей двигателей в процессе эксплуатации.

Большой вклад в изучение изменения технического состояния и долговечности автомобилей, а также процессов их восстановления внесли работы: Ф.Н. Авдонькина, В.А. Бабенко, Е.В. Бондаренко, Ф.Х. Бурумкулова, Д.Н. Гаркунова, Б.В. Гольда, Н.Я. Говорущенко, А.С. Гребенникова, А.С. Денисова, В.Е. Канарчука, В.Н. Казарцева, Е.С. Кузнецова, Б.И. Костецкого, К.Т. Кошкина, Р.В. Кугеля, И.В. Крагельского, Г.В. Крамаренко, Л.М. Лельчука, Л.В. Мирошникова, В.М. Михлина, М.П. Мелкова, А.С. Проникова, Д.Н. Решетова, Ю.В. Родионова, Р.В. Ротенберга, С.В. Серенсена, В.М. Славуцкого, А.М. Шейнина, С.Ф. Щетинина, М.М. Хрущева, А.В. Чичинадзе и других.

В учебном процессе, научных исследованиях и при производстве автомобилей широко используются труды этих и других российских ученых.

Их рекомендации в производстве и эксплуатации позволили повысить надежность силовых агрегатов автомобилей, снизить затраты на обеспечение их работоспособности в эксплуатации. Однако с форсированием двигателей проблема повышения их долговечности остается актуальной.

Изнашивание трущихся поверхностей деталей автомобилей многие исследователи представляют в виде классической кривой износа (рис.1.1).

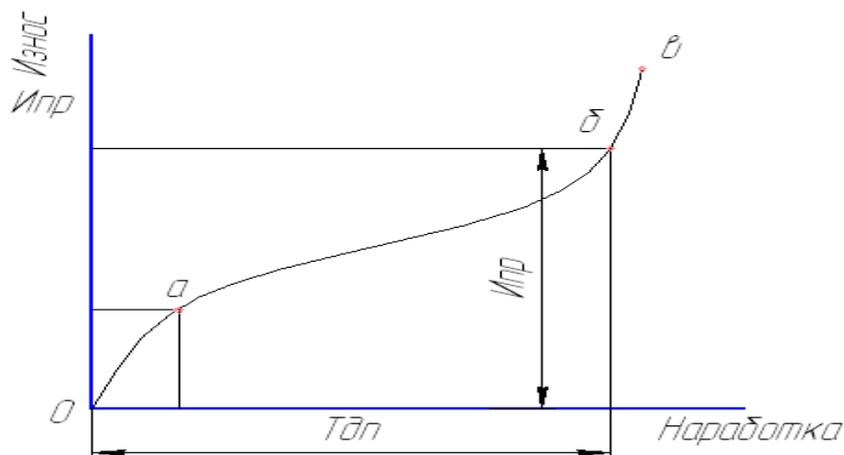


Рис. 1.1. Кривая износа детали:
 оа– зона приработки; аб– зона нормальной эксплуатации;
 бв– зона форсированного износа

В настоящее время нет практически приемлемых безразборных методов измерения величины износа деталей и скорости их изнашивания на различных участках наработки.

В условиях эксплуатации скорость изнашивания деталей, а следовательно, и ее износ зависят не столько от наработки, сколько от большого количества изменяющихся во времени эксплуатации факторов, особенно таких, как силовой и тепловой режимы работы двигателя, количество и длительность его пусковых периодов, климатические условия его работы, качество эксплуатации и технического обслуживания и др. Каждый из перечисленных факторов может оказать значительное влияние на скорость изнашивания деталей, но так как периодичность и длительность их проявления носят случайный характер, контролировать и учитывать эти факторы практически невозможно. В связи с этим очевидно, что скорость изнашивания детали различна и может иметь значительное рассеивание на разных участках наработки агрегата в процессе его эксплуатации. Кроме того, предельные износы (зазоры), обуславливающие предельное состояние деталей (сопряжений), также рассеиваются в сравнительно широких границах. Поэтому кривая износа (рис.1.1) только приближенно описывает фактический процесс изнашивания и ее целесообразнее назвать условной, а не классической.

Изменение технического состояния автомобилей исследователи описывают различными формами кривых изнашивания.

В работе [95] изменение технического состояния автомобиля представлено в виде полинома третьей степени:

$$S = a_0 + a_1 l + a_2 l^2 + a_3 l^3, \quad (1.1)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 ($a_2 > 0$) – параметры, определяемые по экспериментальным данным; S – износ деталей; l – наработка (пробег) автомобиля.

Данная зависимость показывает период приработки деталей и период возникновения, прогрессирующего изнашивания сопрягаемых поверхностей элементов силового агрегата и автомобиля в целом, т.е. автор данную зависимость приводит ко всем сопряжениям. В таком выражении зависимость не отражает сущность процессов, происходящих при контакте сопряжений и износах.

В работах других исследователей [214, 221] зависимость износа элементов силового агрегата, автомобиля от наработки описывается степенной зависимостью:

$$S = S_0 + \omega l^n, \quad (1.2)$$

где S_0 – износ элементов в конце приработки, приведенный к началу эксплуатации; ω – коэффициент, характеризующий интенсивность изнашивания; n – показатель степени (при $n > 1$ – интенсивность изнашивания возрастает в процессе эксплуатации, при $n < 1$ – снижается, при $n = 1$ постоянна).

Данный тип зависимости отражает изменяющуюся скорость изнашивания элементов автомобиля в процессе эксплуатации, но так же как и предыдущая зависимость (1.1), не описывает процессы изнашивания, происходящие в сопряжениях.

Зависимости износа элементов автомобиля и интенсивности их изнашивания в процессе эксплуатации, полученные профессором Ф.Н. Авдонькиным [2, 4], наиболее полно отражают сущность процессов, происходящих в сопряжениях при изменении технического состояния элементов агрегатов и автомобиля в целом. Основные элементы сопряжений автомобиля им разделены на несколько видов, это – динамически нагруженные сопряжения, саморазгружающиеся сопряжения и сопряжения с неизменяющимся давлением в зоне контакта при изменении размеров и формы деталей, вследствие изнашивания.

Развивая результаты исследований проф. М.М. Хрущева, зависимость интенсивности изнашивания α от давления p в зоне трения, проф. Ф.Н. Авдонькин получил прямо пропорциональную зависимость α от износа ΔS и обосновал, что общий износ элементов агрегатов автомобиля в процессе эксплуатации возрастает по экспоненциальной зависимости:

$$S = S_0 e^{bl}, \quad (1.3)$$

и интенсивность изнашивания возрастает также по экспоненциальной зависимости:

$$\alpha = \alpha_0 e^{bl}, \quad (1.4)$$

где α_0 , S_0 – соответственно интенсивность изнашивания и износ в конце приработки, приведенные к началу эксплуатации ($l = 0$); b – изменение интенсивности изнашивания на единицу износа деталей [6].

В исследованиях проф. Денисова А.С. показано, что в динамически нагруженных сопряжениях, в отличие от «классической» кривой изнаши-

вания, после приработки интенсивность изнашивания не остается постоянной, а возрастает линейно от износа (рис.1.2, а) и экспоненциально от наработки (рис.1.2, б). Износ деталей в зависимости от наработки возрастает по экспоненциальной зависимости (рис.1.2, в) [124].

Для саморазгружающихся сопряжений также получены экспоненциальные зависимости соответственно (рис.1.2) [124, 306].

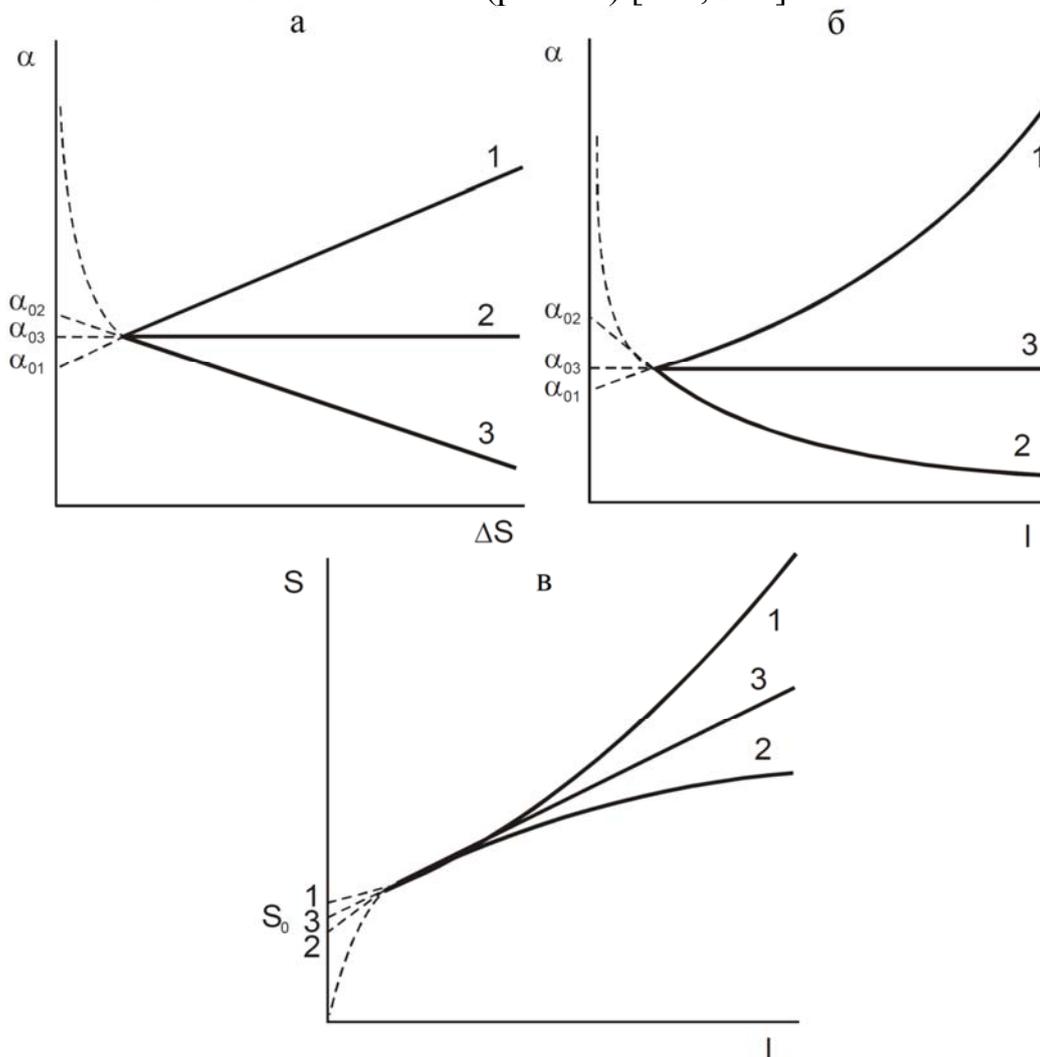


Рис.1.2. Зависимость интенсивности изнашивания α и общего износа S от износа ΔS после приработки (а) и наработки l (б, в) для различных типов сопряжений:

1 – динамически нагруженные; 2 – саморазгружающиеся; 3 – с неизменным в процессе изнашивания давлением в зоне трения

Преобразовывая полученные уравнения, Ф.Н. Авдонькин вывел зависимость интенсивности изнашивания и износа элементов автомобиля от наработки:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-bl}, \quad (1.5)$$

$$S = S_0 + S_0(1 - e^{-bl}), \quad (1.6)$$

где S_0 – износ; α_0 – интенсивность изнашивания в конце приработки, приведенные к началу эксплуатации (рис. 1.2) [2, 6].

Применительно для сопряжения с неизменяющимся давлением в зоне контакта при изменении размеров и формы деталей, вследствие изнашивания им предложены следующие зависимости:

$$\alpha = \alpha_0 = \text{const}, \quad (1.7)$$

$$S = S_0 + \alpha l \quad (1.8)$$

Недостатком описанных зависимостей является то, что они приемлемы для неизменяющихся условий процессов, протекающих в сопряжениях, а в процессе работы эти условия постоянно меняются (температура, давление, скорость и т.д.), в связи с этим рассмотренные зависимости носят стохастический характер.

Развивая дальше исследования профессора Ф.Н. Авдонькина, зависимость (1.3), проф. А.С. Денисов [124] вывел зависимость давления масла от пробега:

$$P = \frac{a}{S_0^m e^{mb_l}} = P_0 e^{-b_p l}, \quad (1.9)$$

где $P_0 = \frac{a}{S_0^m}$ – давление в конце приработки, приведенное к началу эксплуатации; $b_p = m \cdot b$ – экспериментальный параметр; a – конструктивный и режимный параметр.

Для наглядности смысл параметров p_0 и b_p показан на рис.1.3. При небольших оборотах вращения коленчатого вала, режиме холостого хода,

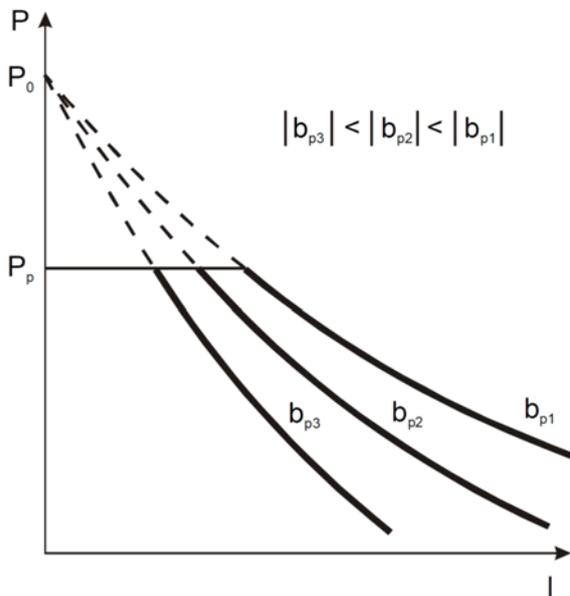


Рис.1.3. К понятию смысла параметров p_0 и b_p :
 P_p – давление, ограниченное редукционным клапаном

давление масла в системе смазки снижается, при номинальной частоте вращения коленчатого вала давление поднимается, но ограничивается работой редукционного клапана, а при повышенных зазорах в сопряжениях, в первую очередь подшипниках коленчатого и распределительного валов, давление масла в системе снижается и не обеспечивает условия гидродинамической смазки в сопряжениях ресурсопределяющих элементов.

С увеличением зазоров в сопряжениях, вследствие их износа, происходит снижение давления масла в системе смазки (рис.1.4), что может привести к граничным условиям смазки в подшипниках

скольжения, это свидетельствует о недостаточной производительности масляного насоса двигателей КамАЗ [123].

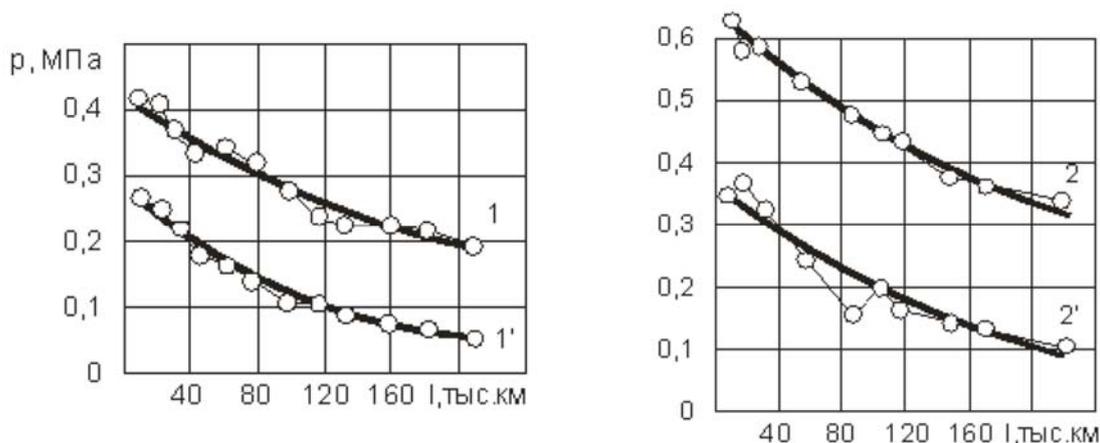


Рис.1.4. Зависимость давления в системе смазки от наработки двигателей:
 1 – КамАЗ-740; 2 – ЯМЗ-236 (без штриха – нормальный режим, со штрихом – режим холостого хода)

Анализ проведенных исследований [123, 124] показывает, что толщина масляного слоя (ТМС) в зависимости от пробега автомобиля уменьшается по экспоненциальной зависимости:

$$h = h_0 e^{-bl}, \quad (1.10)$$

где h_0 – ТМС в конце приработки, приведенная к началу эксплуатации; b – параметр, учитывающий влияние износа на интенсивность изменения технического состояния подшипника.

Проведенные исследования и обработка полученных результатов позволяют определить параметры этой зависимости для силовых агрегатов КамАЗ-740 [105, 123, 124]:

$$h = 50e^{-0,008l} \quad (r = 0,95). \quad (1.11)$$

Графически зависимость толщины масляного слоя от наработки двигателей КамАЗ (1.11) представлена на рис.1.5.

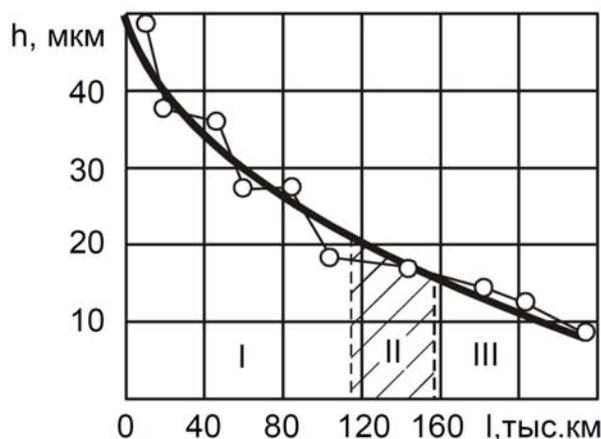


Рис.1.5. Зависимость ТМС от наработки двигателей КамАЗ – 740:
 I – область жидкостного трения; II – перехода в полужидкостное трение;
 III – полужидкостного трения

При исследовании изменения технического состояния саморазгружающихся сопряжений в работах [123, 124] предложено использовать зависимость:

$$y = y_0 + y_1(1 - e^{-bt}). \quad (1.12)$$

Аппроксимируя уравнение (1.12) полиномом второй степени, получим:

$$y = y_0 + at - bt^2, \quad (1.13)$$

где y_0 , a , b – параметры, определенные по методу наименьших квадратов.

Экспериментальные исследования, частично представленные на рис.1.6, показывают справедливость описанных зависимостей [123, 124].

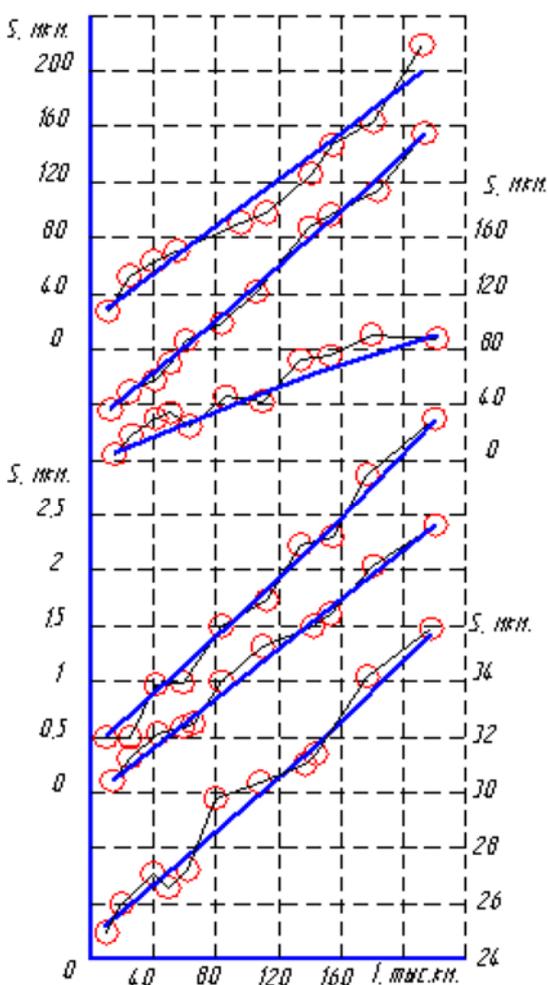


Рис. 1.6. Зависимость показателей технического состояния цилиндропоршневой группы двигателей от наработки:

- 1 – износ гильз; 2 – радиальный износ верхних компрессионных колец;
- 3 – то же маслосъемных; 4 – зазор в стыке верхних компрессионных колец;
- 5 – то же маслосъемных;
- 6 – утечка воздуха из ЦПГ в ВМТ

Из вышесказанного следует, что изнашивание элементов автомобиля в процессе эксплуатации приводит к изменению процессов, протекающих в сопряжениях трущихся поверхностей, и к появлению повреждений, при которых невозможна дальнейшая эксплуатация автомобиля (перегрев, задиры, схватывание и другие), поэтому целесообразно контролировать и предупреждать данные процессы при проведении технического обслуживания и ремонта автомобиля.

Изменение технического состояния сопряжений является следствием изменения размеров и формы деталей.

Изменение размеров и формы ресурсопределяющих элементов в процессе эксплуатации обусловлено неравномерностью изнашивания сопрягаемых поверхностей и остаточными деформациями элементов.

Процесс изнашивания можно условно разделить на три основных этапа – начальный, установившийся и катастрофический. Начальный износ характеризуется микрогеометрической и макрогеометрической прирабатываемостью поверхностей трения. Установившийся износ характеризует срок службы силового агрегата. При катастрофическом износе дальнейшая эксплуатация двигателя без капитального ремонта невозможна.

Интенсивность разрушения зависит от совокупности действия трех групп факторов: физико-химических свойств материала поверхностного слоя, физико-химических свойств среды и условий нагружения (главным образом, давления в зоне трения и скорости относительного перемещения). Последнее существенным образом влияет на использование заложенного ресурса двигателя. Нагрузки, вызывающие напряжения, которые превышают предел упругости, приводят к остаточной деформации и образованию трещин, к проявлению явлений ползучести, что приводит к изменению геометрической формы и размеров деталей.

Дефекты двигателей, снятых в капитальный ремонт, фиксируются в статистике автотранспортных организаций. В табл. 1.1 представлено распределение пробега автомобилей КамАЗ-740 до капитального ремонта двигателей и их дефектам по данным Московского филиала «КАМАЗ автоцентр» [26, 123]. Результаты обработки приведены в табл. 1.3 и на рис. 1.7 [26]. Анализ эксплуатационных отказов силовых агрегатов КамАЗ, проведенный в ООО «Саратовский автоцентр КАМАЗ», представлен в табл. 1.2 [26].

Т а б л и ц а 1.1

Распределение пробега двигателей КамАЗ-740 в доремонтном (Н) и межремонтном (Р) периодах эксплуатации по основным дефектам по данным Московского филиала «КАМАЗ автоцентр», %

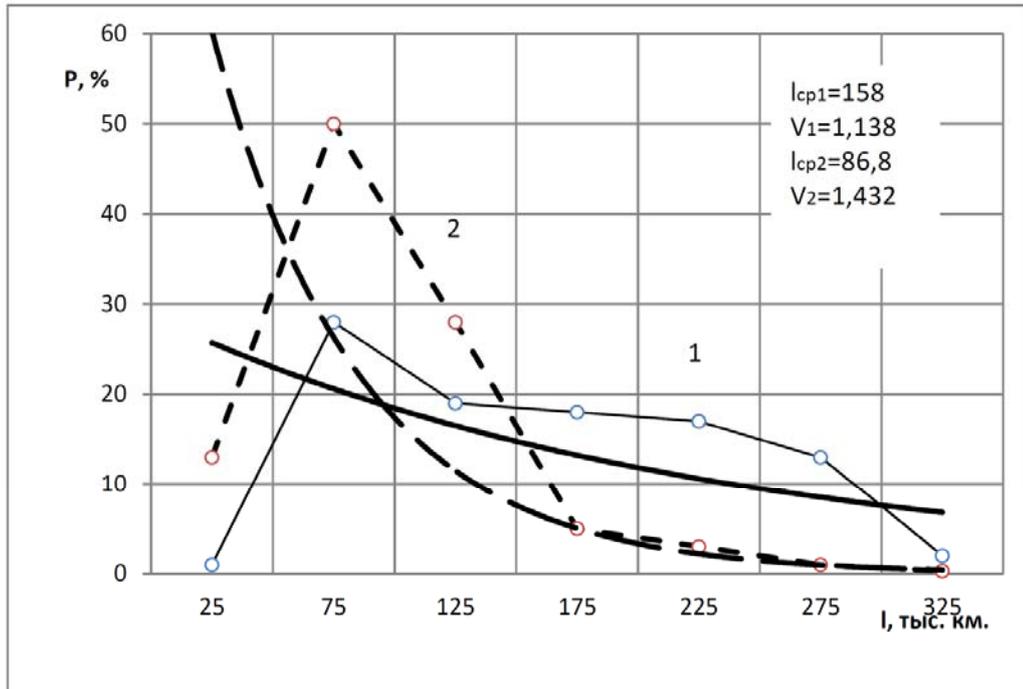
Наименование дефектов	Период	Интервалы пробега, тыс.км								Двигатели с дефектами	
		0-30	30-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	св 350	Всего	НПТ А
1. Естественный износ ЦПГ и КШМ	Н		0,92	0,61	14,24	21,05	20,74	36,22	6,19	44,36	
	Р	0,78	17,32	15,74	22,04	13,38	30,70	-	-	31,51	-
2. Пылевой (абразивный) ЦПГ и КШМ	Н	-	18,94	14,73	34,73	28,42	3,15	-	-	13,04	0,27
	Р	1,92	51,92	26,92	11,53	5,76	1,92	-	-	12,90	-
3. Износ ЦПГ вследствие перегрева двигателя	Н	-	33,34	22,22	22,22	22,22	-	-	-	1,23	-
	Р	10,00	40,00	20,00	20,00	10,00	-	-	-	2,48	-
4. Проворачивание коренных и шатунных вкладышей	Н	1,03	27,83	19,58	18,55	17,52	13,40	2,06	-	13,32	5,08
	Р	13,41	50,00	28,04	4,87	2,43	1,21		-	20,34	9,42
5. Обрыв шатуна, шатунных болтов, поршня	Н	4,50	27,02	20,72	18,01	17,11	9,90	0,90	1,80	15,24	9,06
	Р	18,64	43,37	27,11	6,77	3,38	1,69	-	-	14,64	7,94
6. Поломка коленчатого вала	Н	-	28,57	14,28	28,57	14,28	14,28	-	-	0,96	0,41
	Р	9,09	54,54	27,27	9,09	-	-	-	-	2,72	0,99
7. Трещина блока цилиндров	Н	-	18,57	14,28	17,14	20,00	20,00	7,14	2,85	9,61	0,54
	Р	13,04	43,47	23,91	8,69	4,34	4,34	2,17	-	11,41	0,24
8. Дефекты масляного насоса	Н	-	-	50,00	25,00	25,00	-	-	-	0,54	-
	Р	33,33	33,33	33,34	-	-	-	-	-	0,74	-
9. Прочие	Н	8,33	25,00	25,00	25,00	8,33	8,34	-	-	1,64	-
	Р	23,07	38,46	15,38	7,69	7,69	7,69	-	-	3,22	-
Итого	Н	0,96	13,59	10,43	18,81	20,60	15,10	17,17	3,29	100,00	15,38
	Р	8,93	37,46	22,82	12,40	6,94	11,16	0,24	-	100,00	18,61

НПТА - нарушение регулировки топливной аппаратуры

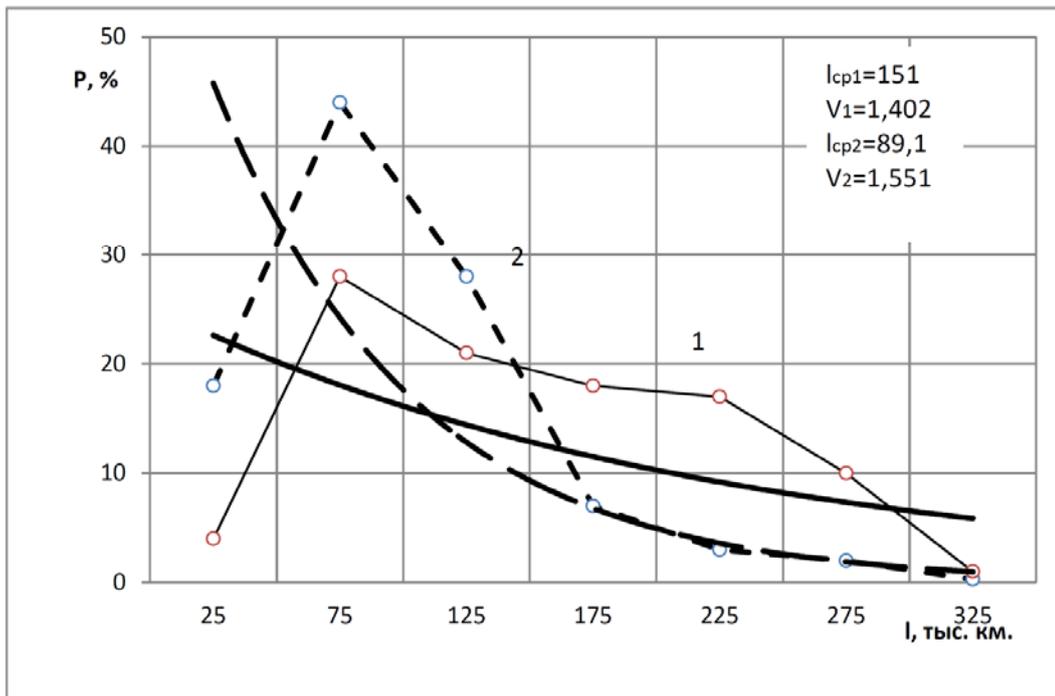
Таблица 1.2

Статистика по отказам отдельных узлов и агрегатов автомобилей КАМАЗ
с двигателями семейства «ЕВРО», собранная за период 2005-2006 гг.
в условиях ООО «Саратовский автоцентр КАМАЗ»
Распределение отказов по элементам автомобилей

Элементы	%	Затраты в %	Затраты			Число
			Услуги	Запчасти	Всего	
Двигатель:	35,3	52,6	326689	1021362	1348051	203
Коленвал и вкладыши	2,8	1,2	24160	7700	31860	16
Блок цилиндров	0,5	0,4	4800	4200	9000	3
ГРМ	0,2	0,1	500	1975	2475	1
Головка блока	1,7	1,3	10750	22985	33735	10
Турбокомпрессор	4,0	7,5	19300	172367	191667	23
ТНВД	6,3	7,6	89300	105166	194466	36
Форсунки	2,3	0,7	7800	8970	16770	13
Система охлаждения	10,8	3,5	41540	47944	89484	62
Система смазки	2,1	0,6	3430	10743	14173	12
Число КР	1,9	27,5	107130	598596	705726	11
Остальное	2,8	2,3	17979	40716	58695	16
Трансмиссия:	27,3	34,6	234170	652452	886622	157
Делитель	5,9	2,0	20900	29797	50697	34
Средний мост	5,6	12,2	55170	256186	311356	32
Задний мост	5,9	8,8	47390	178805	226195	34
Карданный вал	1,4	0,5	3850	7700	11550	8
Остальное	37,4	13,1	151040	185130	336170	215
Передний мост	3,0	1,5	18140	20640	38780	17
Рулевое управление	6,4	1,6	19030	22875	41905	37
Тормозные системы	7,8	4,0	23030	80282	103312	45
Подвеска	1,9	0,4	4750	4900	9650	11
Электрооборудование	11,0	1,6	29980	10843	40823	63
Стартер	3,3	1,3	7700	26755	34455	19
Колеса, шины	0,7	0,3	7000	600	7600	4
Кабина, рама, платформа	3,1	2,3	40210	17735	57945	18
Спецоборудование	0,2	0,1	1200	500	1700	1
Итого	100	100	707099	1854744	2561843	575



а



б

Рис.1.7. Распределение наработки двигателя КамАЗ-740 до капитального ремонта по причинам:
 а – проворачивания коренных и шатунных вкладышей; б – обрыва шатуна, шатунных болтов; 1 – в доремонтном периоде, 2 – в межремонтном периоде

Нарушение правил эксплуатации автомобиля приводит к перегрузкам элементов силового агрегата, что обуславливает их быстрый выход из строя.

Из табл. 1.1 видно, что у двигателей, работающих с распломбированной системой топливного насоса высокого давления (ТНВД) чаще всего встречаются дефекты № 4,5,6 табл. 1.1. Процент таких двигателей достаточно высок и достигает до 59% от двигателей, имеющих аналогичные дефекты (табл.1.3) [26].

Анализ результатов исследований (табл. 1.1, 1.3) показывает, что в доремонтный период в капитальный ремонт поступает 44,36% силовых агрегатов, в межремонтный период 31,51%. При этом коэффициент вариации пробега до капитального ремонта по рассматриваемым дефектам незначителен, а закон распределения наработки до капитального ремонта близок к нормальному.

Анализ исследуемых дефектов (табл. 1.1), приводящих к выходу силового агрегата из строя показывает, что по их причине доля двигателей в 1,62 раза больше в межремонтном периоде, нежели в доремонтном.

В общем, анализируя большое количество аварийных отказов силовых агрегатов можно видеть существенную вариацию наработки до капитального ремонта двигателя ($V > 1$), это соответствует экспоненциальному закону распределения, что в большей степени проявляется при аварийных отказах. Характерным примером являются дефекты, связанные с поломкой шатуна, коленчатого вала, проворачиванием вкладышей, как в нижней головке шатунов, так и в опорах блока цилиндров рис.1.7 [26].

О качестве капитального ремонта двигателя можно судить по величине наработки на отказ и соотношению рассеивания пробега до ремонта силового агрегата табл.1.4. Нарушения правил эксплуатации автомобиля, в частности разрегулирование топливного насоса высокого давления приводит к повышению коэффициента вариации пробега до ремонта табл.1.3 [26, 123].

Низкий ресурс двигателей после капитального ремонта и в частности его элементов табл. 1.4, обусловлен несколькими факторами:

- не обеспечением условий жидкостного трения в подшипниках скольжения, вследствие снижения давления в смазочной системе;
- потерей соосности поверхностей базовых элементов, в следствии их напряженно-деформированного состояния;
- накопления усталостных напряжений нагруженных элементах двигателя (трещины) на коленчатых валах, опорах блоков цилиндров, шатунах и т.д. Большая неоднородность составляющих при капитальном ремонте приводит к снижению вторичного ресурса элементов двигателя, что видно по коэффициентам вариации, у отремонтированных двигателей он в 1,08-2,43 (в среднем в 1,32) раза выше, чем у неремонтированных.

Таблица 1.3

Параметры распределения наработки до первого КР (Н)
и между КР (Р) двигателей КамАЗ-740

Наименование дефектов	Период	Параметры			Доля двигателей с распломбированными ТНВД
		Среднее значение, тыс. км	Средне-квадратическое отклонение, тыс. км	Коэффициент вариации	
1. Естественный износ ЦПГ и КШМ	Н	271,3	149,9	0,552	
	Р	184,1	157,7	0,857	-
2. Пылевой (абразивный) износ ЦПГ и КШМ	Н	163,6	116,9	0,714	2,07
	Р	106,1	127,3	1,200	-
3. Износ ЦПГ вследствие перегрева двигателя	Н	138,3	106,7	0,772	-
	Р	110,0	130,6	1,188	-
4. Проворачивание коренных и шатунных вкладышей	Н	158,0	179,7	1,138	38,13
	Р	86,8	123,5	1,423	46,31
5. Обрыв шатуна, шатунных болтов, поршня	Н	151,0	211,7	1,402	59,44
	Р	89,1	138,2	1,551	54,23
6. Поломка коленчатого вала	Н	158,0	140,9	0,892	45,05
	Р	86,8	84,3	0,971	36,39
7. Трещина блоков цилиндров	Н	193,8	205,4	1,059	5,61
	Р	104,5	182,9	1,751	2,10
8. Дефекты масляного насоса	Н	162,5	64,0	0,394	-
	Р	68,3	65,0	0,958	-
9. Прочее	Н	134,0	160,6	1,198	-
	Р	99,7	176,5	1,769	-
10. Итого	Н	211,0	225,0	1,067	15,38
	Р	122,9	173,8	1,414	18,61

Таблица 1.4

Соотношение параметров долговечности двигателей КамАЗ-740
в межремонтном и доремонтном периодах эксплуатации

Наименование дефектов	\bar{l}_p / \bar{l}_n	V_p / V_n
1. Естественный износ ЦПГ и КШМ	0,67	1,55
2. Пылевой (абразивный) износ ЦПГ и КШМ	0,64	1,68
3. Износ ЦПГ вследствие перегрева двигателя	0,79	1,53
4. Проворачивание коренных и шатунных вкладышей	0,54	1,25
5. Обрыв шатуна, шатунных болтов, поршня	0,58	1,10
6. Поломка коленчатого вала	0,55	1,08
7. Трещина блока цилиндров	0,53	1,65
8. Дефекты масляного насоса	0,42	2,43
9. Прочие	0,74	1,47
10. Итого	0,58	1,32

\bar{l}_p и \bar{l}_n - средняя наработка до КР соответственно до повторного и до первого;
 V_p и V_n - соответствующие коэффициенты вариации.

В капитальный ремонт (КР) по причине естественного износа деталей поступает 44,36% неремонтированных и 31,51% отремонтированных двигателей. Аварийные повреждения основных деталей обусловлены нарушением правил эксплуатации (распломбирование ТНВД).

Доремонтный ресурс двигателя (агрегата) исчерпывается с появлением первого ресурсного отказа, при котором двигатель (агрегат) направляется в первый ремонт. Следовательно, доремонтный ресурс двигателя (агрегата) равен ресурсу той или иной детали, того или иного сопряжения или другого элемента, отказ которых относится к категории ресурсных.

В основном показатели надежности двигателя определяются техническим состоянием таких ресурсоопределяющих элементов, как подшипники коленчатого вала, цилиндропоршневая группа, блок двигателя, турбокомпрессор, на которые приходятся 37% отказов и 62% затрат на ремонт [4, 12, 123].

При первом ремонте заменяют все элементы, у которых остаточный ресурс меньше установленной величины межремонтного ресурса двигателя (агрегата). Это способствует повышению качества и уровня долговечности силового агрегата. Однако этот восстановительный уровень надежности двигателя будет всегда меньше первоначального уровня на величину использованного ресурса деталей, сопряжений и других элементов, оставленных без ремонта для работы.

Межремонтный ресурс отремонтированного двигателя (агрегата) также исчерпывается ресурсом наименее долговечной детали или другого элемента.

Ресурс этих элементов, даже если при ремонте были установлены новые или восстановленные, до первоначального размера детали, будут всегда меньше, чем на новом двигателе (агрегате), вследствие увеличения скорости их изнашивания, из-за искажения размерных и кинематических связей тех, бывших в эксплуатации узлов и агрегатов, у которых изношены или покороблены детали (в допустимых пределах). Это относится к таким ресурсоопределяющим деталям силового агрегата, как:

- блок цилиндров двигателя – постели блока, поверхности под вкладыши коренных шеек коленчатого вала, которые при проведении ремонта агрегата необходимо не только проверять на соответствие размеров и формы, но и проверять соосность постелей блока;

- корпус коробки передач – посадочные места под подшипники;

- шатун – поверхность сопряжения нижней головки шатуна с вкладышем, а также сопряжение в верхней головке шатуна с втулкой, параллельность нижнего и верхнего отверстий шатуна, деформации корпуса шатуна;

- коленчатый вал – размеры и форма шеек, наличие трещин на них, прогиб вала;

– турбокомпрессор – изменение соосности посадочных отверстий подшипников турбокомпрессора, вследствие высоких температур нагрева корпуса.

Поэтому в работе акцент сделан на повышение долговечности именно этих элементов двигателя (блок цилиндров, шатун, коленчатый вал, турбокомпрессор), достаточно дорогих, как по стоимости, так и в услугах на ремонт (их замену).

Кроме того, межремонтный ресурс обусловлен также и качеством произведенного ремонта. Вторичный ресурс составляет около 58% первичного, и обусловлено это усталостными напряжениями в элементах двигателей, образованием трещин и их развитием, изменением соосности опорных поверхностей блока цилиндров, что приводит к поломкам коленчатого вала, образованиям трещин в блоке и т.д.

Для повышения долговечности двигателей необходимо контролировать изменения технического состояния их ресурсопределяющих элементов при проведении ремонтных работ, совершенствовать технологию и качество ремонта.

Анализ эксплуатационных дефектов элементов двигателей, вышедших из строя, указывает на принципиальную возможность повышения эксплуатационных характеристик силовых агрегатов за счет использования современных восстановительных и упрочняющих технологий.

За рубежом уделяют большое внимание вопросам технологии и организации восстановления деталей. В высокоразвитых странах – США, Англии, Германии, Японии – восстановление в основном осуществляется на предприятиях-изготовителях автомобилей. Восстанавливают дорогостоящие, металлоемкие детали: блоки цилиндров, коленчатые валы, корпуса коробок передач, головки блока и т.д., при этом себестоимость восстановления для большинства деталей не превышает 20-30% стоимости новых [86, 294, 295, 296, 298].

1.2. Изменение геометрической формы элементов силовых агрегатов автомобилей в процессе эксплуатации

Размер и форма рабочих поверхностей деталей в значительной степени влияют на техническое состояние сопряжений, изменение которых в процессе эксплуатации приводит к повышению интенсивности изнашивания ресурсопределяющих элементов. Экспериментальные данные [116, 123, 124, 129, 26, 136, 172, 190, 191, 194, 278], частично приведенные на рис. 1.8, подтверждают полученные зависимости изменения размеров и формы деталей силового агрегата от наработки.

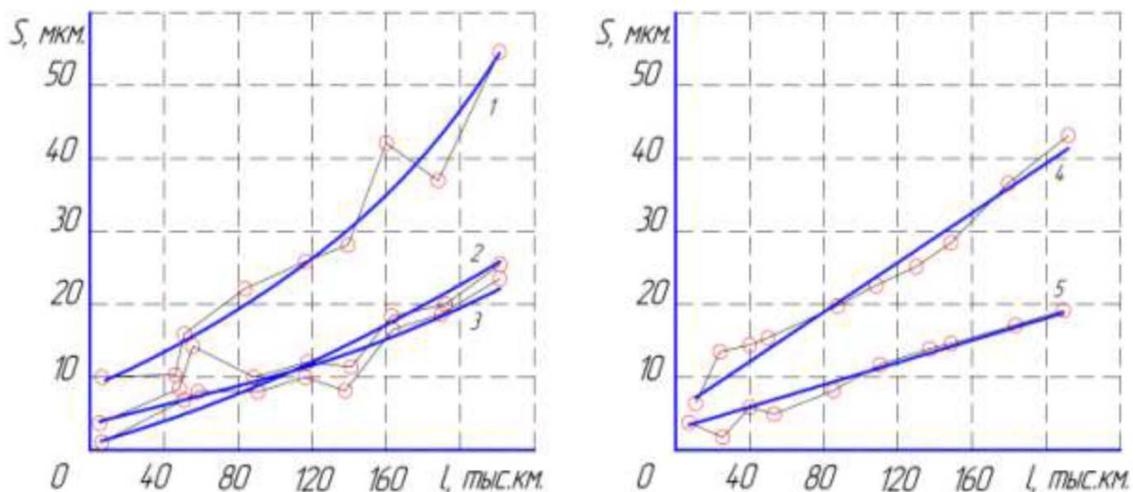


Рис.1.8. Зависимость прогиба коленчатого вала – 1, овальности коренных – 2, шатунных – 3 шеек, гильз цилиндров в изношенном – 4, и неизношенном – 5 поясах от наработки двигателя КамАЗ-740

Прогиб коленчатого вала в процессе эксплуатации проявляется вследствие действия газовых и инерциальных сил. Вследствие того, что зазоры в сопряжении вкладыш – шейка коленчатого вала возрастают, вследствие износа, и увеличиваются по экспоненциальной зависимости, то и геометрические изменения коленчатого вала, прогиб вала, возрастает по такой же зависимости [124]:

$$J = J_0 e^{bl}, \quad (1.14)$$

где J_0 – прогиб в конце приработки; b – параметр, учитывающий влияние зазора на интенсивность деформации вала (параметр « b » в данном случае меньше по величине, чем в зависимости зазора от наработки, так как не учитываются прогиб нового вала и значительная жесткость коленчатого вала).

Неравномерность изнашивания шеек коленчатого вала (овальность, конусность) обусловлена вероятностью возникновения контакта между микровыступами сопрягаемых поверхностей, вследствие изменяющейся толщины масляного слоя в сопряжении вкладыш – шейка коленчатого вала и зависит от условий смазки в нем и воспринимаемых нагрузок. Износ на поверхности шатунных шеек в большей степени проявляется в плоскости действия газовых сил. Расположение зон наибольшего и наименьшего износа у коренных шеек также зависит от направления приложенной нагрузки, но в значительной степени на износ в сопряжении подшипников скольжения играют условия обеспечения жидкостной смазки.

Учитывая неравномерность изнашивания по поверхности трения, проф. А.С. Денисов вывел зависимость возникновения овальности рабочей поверхности от наработки [124]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{bl}, \quad (1.15)$$

где ε_0 – овальность рабочей поверхности в конце приработки.

Аналогичный механизм возникновения овальности, вследствие действия газовых и инерционных сил, наблюдается в коренных опорах блока цилиндров и в нижней головке шатуна. Кроме этого, в неподвижном соединении (вкладыш и опора блока цилиндров или нижняя головка шатуна) изменение размеров и формы сопрягаемых поверхностей происходит вследствие фреттинг-изнашивания.

Приведенные данные свидетельствуют о закономерном изменении в процессе эксплуатации размеров и геометрической формы деталей силового агрегата, что сокращает ресурс сопряжения и агрегата в целом.

В связи с этим, изменение технического состояния элементов автомобилей целесообразно предупреждать, используя методы диагностирования и восстановления размеров и формы элементов агрегатов по их техническому состоянию.

1.3. Анализ дефектов основных элементов деталей двигателя КамАЗ-740

1.3.1. Анализ дефектов коленчатого вала

Коленчатый вал (КВ) (рис.1.9) работает в 8-цилиндровом v-образном двигателе КамАЗ и его модификациях, которые устанавливаются на грузовые автомобили и самосвалы КамАЗ, а также на тракторы ХТЗ, Т150, комбайны «Дон», «Полесье» и стационарные энергетические установки [123].

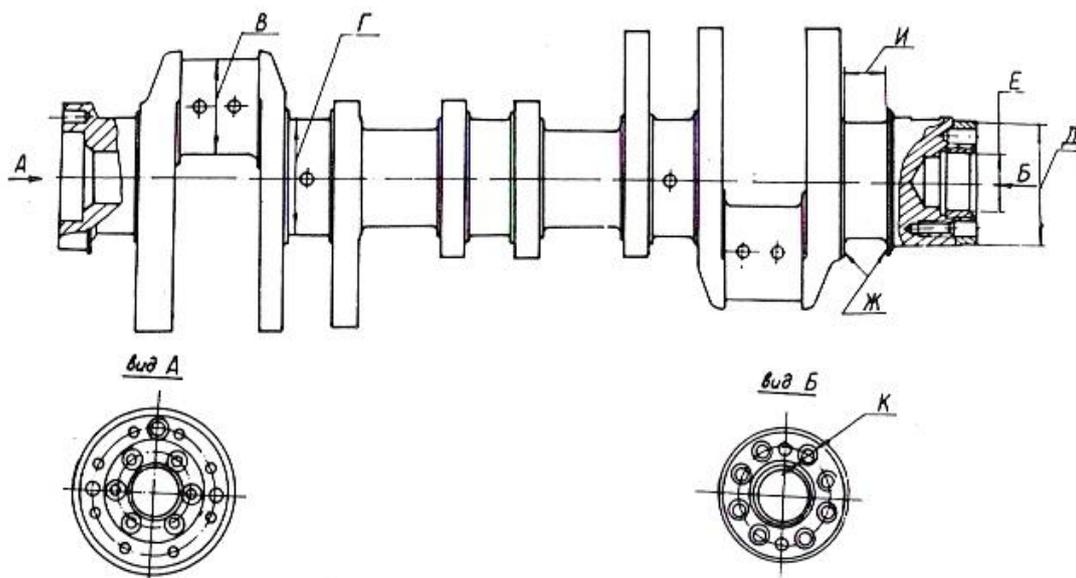


Рис. 1.9. Коленчатый вал двигателя КамАЗ-740

Мощность двигателя 154 кВт (210 л.с.) при номинальной частоте вращения коленчатого вала 2600 мин⁻¹; максимальный крутящий момент на коленчатом вале 637 Н·м (65кг·м) при частоте вращения коленчатого вала 1600-1800 мин⁻¹ [7, 123].

Коленчатый вал – одна из основных деталей двигателя, определяющая его ресурс, наиболее сложная в конструктивном отношении и наиболее напряженная деталь, воспринимающая периодические нагрузки от сил давления газов, сил инерции и их моментов. Действие этих сил и моментов приводит к возникновению в материале коленчатого вала значительных напряжений скручивания, изгиба и растяжения – сжатия. Кроме того, периодически изменяющиеся моменты вызывают крутильные колебания вала, которые создают дополнительные напряжения кручения.

Заготовки коленчатых валов выполняются ковкой из стали 42 ХМФА ТУ 14-1-1296-75. Материал для изготовления коленчатых валов поставляется не термообработанный в прутках (НВ 255-277), химический состав представлен в табл. 1.5 [123].

Т а б л и ц а 1.5

Химический состав стали 42 ХМФА

Наименование материала	Содержание, %
углерод	0,40-0,45
кремний	0,27-0,37
марганец	0,5-0,8
ванадий	0,08-0,12
хром	1,0-1,8
молибден	0,35-0,45
сера	0,01-0,035
фосфор	0,025
медь	0,35
никель	0,3
железо	остальное

Свойства стали, из которой формообразуется заготовка коленчатого вала, исследуемые на образцах, должны соответствовать требованиям завода изготовителя, которые представлены в табл.1.6 [123].

Т а б л и ц а 1.6

Наименование параметра	Направление волокон проката	
	продольное	поперечное
Временное сопротивление, МПа	880	880
Предел текучести, МПа	730	730
Относительное удлинение, %	12	7
Относительное сужение, %	55	35
Ударная вязкость, МПа	100	60
Предел усталости на изгиб, МПа	360	320

Коленчатый вал имеет пять коренных и четыре шатунных шейки. Коренные и шатунные шейки коленчатых валов закалены ТВЧ НРС (52...62).

Номинальный и ремонтные размеры шеек коленчатых валов и другие показатели геометрических и поверхностных свойств нового и восстановленного коленчатых валов представлены 1.7 [123].

Т а б л и ц а 1.7

Наименования параметров	Значения параметров	
	нового	восстановленного
1. Диаметр коренных шеек, мм 1-го ремонтного размера 2-го ремонтного размера 3-го ремонтного размера 4-го ремонтного размера	95,0-0,015	95,0-0,015 94,5-0,015 94,0-0,015 93,5-0,015 93,0-0,015
2. Шероховатость цилиндрической части, мкм	0,20	0,16
3. Ширина коренных шеек, мм 1,2,3,4,5 1-го ремонтного размера 1,2,3,4,5	36 – 0,17 36,2 ± 0,05	36 +0,20 -0,17 36,5 +0,05 36,5 + 0,05
4. Радиус галтелей коренных шеек, мм 1,2,3,4,5	3± 0,15	3±0,15
5. Диаметр шатунных шеек: 1-й ремонтный размер 2-й ремонтный размер 3-й ремонтный размер 4-й ремонтный размер	80 – 0,015	80 – 0,015 79,5-0,013 79,0 -0,013 78,5 – 0,013 78,0-0,013
6. Шероховатость цилиндрической части, мм	0,20	0,16
7. Ширина шатунных шеек	67±0,12	67+0,22
8. Радиус галтелей	4±0,15	4±0,15
9. Ширина щек, мм 1 и 8 2,3,4,5. 6,7 Масса, кг	36,3-0,4 27,4 26,6 69,5	

Анализ технического состояния коленчатых валов, поступивших с двигателями КамАЗ-740 в капитальный ремонт, исследовали на ЗАО «Ремдизель» [123].

Дефекты коленчатых валов и коэффициенты их повторяемости приведены в табл.1.8 и 1.9.

Т а б л и ц а 1.8

Наименование дефекта	Количество КВ, имеющих дефекты	Коэффициент повторяемости дефектов
1. Проворот, задир коренных или шатунных шеек, а также их аварийный износ, (прВ)	124	0,220
2. Деформация КВ выше допустимой (биение 3-й коренной шейки более 0,03 мм) (Б)	385	0,690
3. Трещины на коренных и шатунных шейках (ТрШ)	40	0,070
4. Износ шеек более 4-го ремонтного размера (Ипр)	8	0,015
5. Трещины на торцах вала (ТрТ)	21	0,040
6. Ослабление посадки, смятие штифтов и разрушение резьбовых отверстий под болты крепления маховика (ШтБ)	104	0,190
7. Разрушение резьбы М10 под полумуфту отбора мощности (РМ10)	12	0,210
8. Износ или повреждение поверхности (диаметр 125 (И125))	1	0,002
9. Износ гнезда подшипника более диаметра 52,02 мм или его забоины (И52)	28	0,060
10. Увеличение длины 5-й коренной шейки более 36,28 мм (L5к)	15	0,030
11. Забоины на коренных и шатунных шейках (ЗБ)	11	0,020

Из анализа 560 исследуемых коленчатых валов было выявлено, что имеющими устранимые дефекты были 470 коленчатых валов или 84%, а неремонтопригодными, то есть имевшими неустраняемые дефекты – 90 коленчатых валов, или 16% [123].

Таблица 1.9

Наименование неустраняемых дефектов	КВ с неустраняемыми дефектами		Коэффициент повторяемости дефектов
	шт.	%	
1. Провороты, задиры коренных или (и) шатунных шеек, а также их аварийный износ, не устраняемый шлифованием	53	58,9	0,090
2. Деформация КВ выше предельного (биение 3-й коренной шейки более 0,9 мм)	26	28,9	0,050
3. Трещины на коренных и шатунных шейках, не устраняемые шлифованием	36	40	0,060
4. Износ более 4-го ремонтного размера коренных или шатунных шеек	7	7,8	0,010
5. Излом КВ	8	8,8	0,010
6. Увеличение длины 5-й коренной шейки более 36,58 мм (износ)	5	5,6	0,010
7. Забоины на шатунных или (и) коренных шейках, не устраняемые шлифованием	2	2,2	0,004
8. Срыв резьбы или забой резьбы под болт крепления маховика	5	5,6	0,010
9. Износ гнезда подшипника более диаметра 52,02 мм или его забоины	2	2,2	0,004
10. Трещины на торцах	2	2,2	0,004

Срок службы коленчатого вала характеризуется возможным числом восстановления шеек под ремонтный размер.

Для анализа дефектов коленчатых валов, проявляющихся в процессе эксплуатации (износов, задигов и биения шеек коленчатых валов), проводились исследования по данным микрометража 527 коленчатых валов в ЗАО «Ремдизель» [123, 124].

Исследования показали, что выбракованы:
из-за деформации (биению) – 61 коленчатый вал – (11,6%);
из-за наличия трещин – 24 коленчатых вала – (4,6%);
из-за задиров шеек – 105 коленчатых валов – (19,9%);
находятся в пределах номинального размера – 160 коленчатых валов (30,4%);
вышедшие за предельные значения – 27 коленчатых валов (5,1%).

По деформации (биению) коленчатых валов:

биение в пределах 0–0,1 мм – 424 коленчатых вала, из них 12 коленчатых валов с трещинами (12,8%), 24 коленчатых вала с задирками шеек (5,7%);

биение в пределах 0,1–0,9 мм – 72 коленчатых вала, из них 8 коленчатых валов с трещинами (11,1%), 57 коленчатых валов с задирками шеек (79,2%);

биение в пределах 0,9–2,5 мм – 31 коленчатый вал, из них 4 коленчатых вала с трещинами (12,9%), 26 коленчатых валов с задирками (83,9%).

Анализ исследований показывает, что основной причиной выбраковки коленчатых валов являются задирки шеек, трещины на них (рис.1.10) и деформация (биение) коленчатого вала при незначительных износах самих шеек, находящихся в поле допуска на размер.

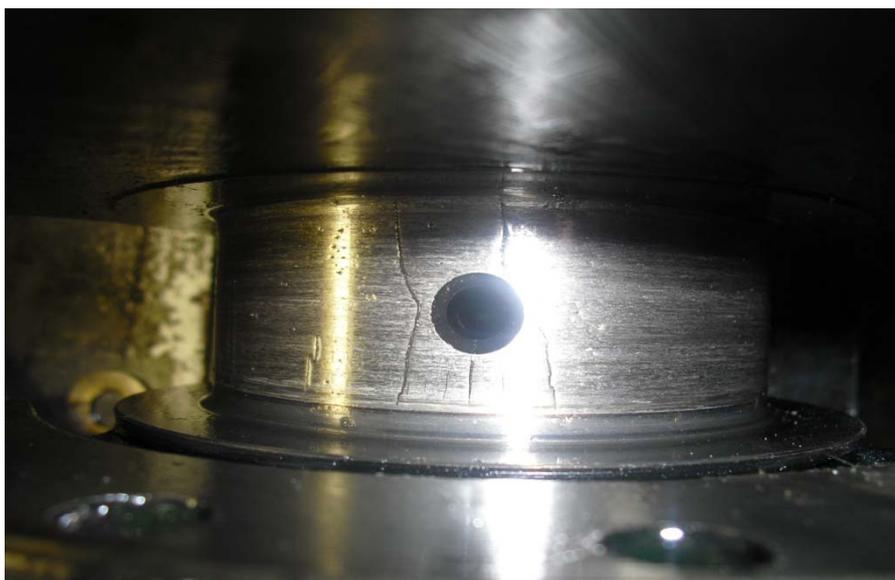


Рис. 1.10. Задирки и трещины на шейке вала

При образовании задиров на шейках коленчатых валов возрастает вероятность образования на них трещин и деформации, статистическая связь между образованием трещин и образованием биения коленчатого вала слабая ($\delta=4$), а связь между образованием задиров на шейках валов и биением коленчатого вала весьма сильная ($\delta=30$).

С увеличением прогиба коленчатых валов возрастает и количество неремонтопригодных валов, их выбраковка.

При прогибе коленчатого вала более 0,9 мм его не целесообразно восстанавливать из-за образования в нем усталостных трещин, при этом до 90% валов с таким прогибом подлежат выбраковке.

Анализ этих данных показывает, что прогиб выбракованных коленчатых валов в 8,6 раз больше, чем у коленчатых валов, подлежащих восстановлению. Коленчатые валы, подлежащие восстановлению, имеют значительное рассеивание величины прогиба ($v=1,675$).

При правильной эксплуатации автомобиля и наработке 200-250 тыс. км биение коленчатого вала в среднем составляет 0,05 мм, при увеличении биения 0,1 мм и выше растет вероятность образования задиров, схватывания шейки с вкладышем (рис. 1.11), что характерно для работы подшипников коленчатого вала в граничных условиях смазки и приводит к проворачиванию вкладышей, прогибу коленчатого вала величиной более 1 мм и его выбраковке.

Процессы, приводящие к проворачиванию вкладышей коленчатых валов, рассмотрены в работах [26, 112, 190, 191].



Рис. 1.11. Задирь на шейке вала, результат схватывания с вкладышем

Еще одним фактором, характеризующим долговечность коленчатого вала, является сопротивление усталостным нагрузкам.

Несмотря на различный характер внешнего проявления отказов, обусловленных изнашиванием и усталостью, в их основе лежат одни и те же физические процессы, описываемые закономерностями механики разрушения, согласно которым большинство видов изнашивания носит усталостный характер.

На сопротивление усталостным нагрузкам в значительной степени влияют однородность материала изделия и качество его изготовления.

В процессе изготовления коленчатых валов, при формировании заготовки (штамповкой) и последующей механической обработке их выбраковка составляет около 3%, большинство которых имеют трещины, в основном по штамповому стыку (рис.1.12) [123]. Образование трещин на шейках коленчатых валов при изготовлении значительно снижает их эксплуатационный ресурс.



Рис. 1.12. Усталостные трещины на шейке вала

Кроме того, долговечность КВ, восстанавливаемых перешлифовкой под ремонтный размер, зависит от точности геометрических и координатных размеров. Несоответствие зазоров техническим условиям (ТУ) в сопряжении «шейка-вкладыш», изменение макрогеометрии и шероховатости шеек ведут к ухудшению условий работы сопряжения, вызывающему интенсивное увеличение задиров сопряжения в процессе приработки [5, 92, 98].

Анализ результатов исследований дефектов коленчатых валов, появляющихся в процессе эксплуатации, показывает, что выход из строя коленчатых валов в большинстве случаев происходит:

- из-за задиров шеек;
- при доминирующем влиянии изгиба в плоскости кривошипа;
- из-за разрушения его вследствие постоянного роста деформаций и трещин и постепенного накопления локальных дефектов.

Таким образом, для повышения долговечности коленчатых валов необходимо совершенствовать систему смазки их подшипников, особенно шатунных, контролировать формоизменение сопряжений, убирать прогиб коленчатого вала. После ремонта коленчатого вала проверять точность геометрических и координатных размеров шеек, величину радиуса галтельных переходов шатунных и коренных шеек, соответствие их ТУ, создавать на шейках коленчатых валов покрытия, позволяющие повысить антизадирные свойства сопряжения при граничных условиях смазки, промерять посадочные места под вкладыши у шатунов и у постелей блока цилиндров.

1.3.2. Анализ дефектов блоков цилиндров

Блок цилиндров является основной корпусной деталью двигателя (рис.1.13) и представляет собой отливку из чугуна с вермикулярным графитом. Отливку подвергают искусственному старению для снятия термических напряжений, что позволяет блоку сохранить правильные геометрические формы и размеры в процессе эксплуатации. Два ряда цилиндров, отлитых как одно целое с верхней частью картера, расположены под углом 90° один к другому (рис.1.13). Левый ряд цилиндров смещен относительно правого вперед на 29,5 мм, что обусловлено установкой на каждую шатунную шейку коленчатого вала двух шатунов рядом. В каждом ряду имеется по четыре цилиндра, выходящие на верхние обработанные плоскости, которые служат привалочными поверхностями для головок цилиндров. Привалочные поверхности отличаются высокой плоскостностью и параллельны оси расточек под подшипники коленчатого вала.

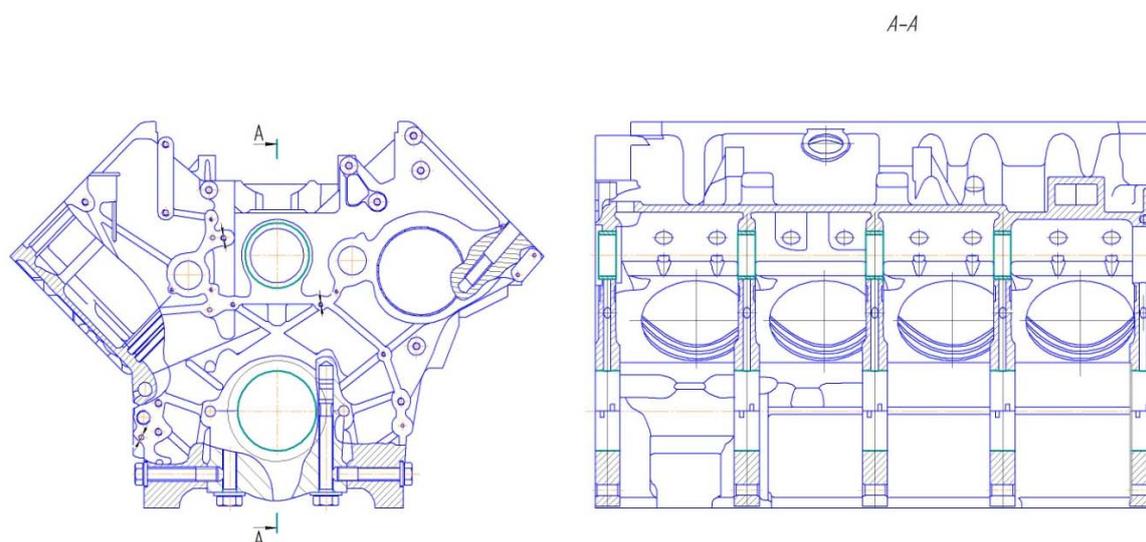


Рис. 1.13. Блок цилиндров двигателя КамАЗ

Каждый цилиндр имеет два соосных цилиндрических отверстия, выполненных в верхнем и нижнем поясах блока, по которым центрируются гильзы цилиндра, и выточки в верхнем поясе, образующие кольцевые площадки под бурты гильз. Чтобы обеспечить правильную посадку гильзы в блоке, параметры плоскостности и перпендикулярности упорной площадки под бурт гильзы к общей оси центрирующих расточек выполнены с высокой точностью. На нижнем поясе выполнены две канавки под уплотнительные кольца, которые предотвращают попадание охлаждающей жидкости из полости охлаждения блока в полость масляного картера двигателя. Бобышки болтов крепления головок цилиндров выполнены в виде приливов к поперечным стенкам, образующим рубашку охлаждения и равномерно распределены вокруг каждого цилиндра.

Картер данного дизеля относится классу 1А (Е), т.е. имеет соосные отверстия одинаковых диаметров (индекс 1) со свободным (для люнетов) доступом к промежуточным отверстиям (индекс А) и представляет собой систему координированных параллельных рядов глубоких прерывистых отверстий, в которых закреплены тонкостенные втулки – вкладыши (Е). Картерная часть блока связана с крышками коренных подшипников коренными и стяжными болтами. Центрирование крышек коренных подшипников производится по горизонтальным штифтам, которые запрессованы на стыке между блоком и крышками, но большей частью входят в блок для предотвращения их выпадения при снятии крышек.

Кроме того, крышка пятой коренной опоры центрируется в продольном направлении по двум вертикальным штифтам, обеспечивая точность совпадения расточек под упорные полукольца коленчатого вала на блоке и на крышках.

В процессе работы двигателя блок цилиндров испытывает значительные нагрузки от сил давления газов в цилиндрах, от сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс, а также передает реактивный крутящий момент на раму автомобиля и испытывает значительные тепловые нагрузки из-за неравномерного нагрева его отдельных частей, т. е. неравномерного распределения тепловых полей. Кроме того, блок цилиндров подвергается коррозии под действием агрессивных сред.

Одним из дефектов, по которому в капитальный ремонт поступают силовые агрегаты является проворачивание вкладышей и количество таких двигателей значительно (до 40%) [80, 120, 123, 190]. Проворачивание вкладышей обусловлено их напряженно-деформированным состоянием, приводящим к образованию прогиба вкладыша, этот процесс не внезапный, а постепенно развивающийся [26].

Причинами проворачивания коренных вкладышей являются падение давления в системе смазки, граничные условия смазки, перегрев и деформации вкладышей.

Изменение размеров и формы отверстий коренных опор от нормативных снижает натяг вкладыша с постелью блока, что приводит к снижению коэффициента теплоотдачи, нагреванию подшипников, схватыванию их с шейкой коленчатого вала и проворачиванию (рис.1.14).

Исследования изношенных вкладышей показали, что натир в средней части, с характерными цветами побежалости, с разрушением антифрикционного слоя постепенно увеличиваются и занимают значительную площадь, приводя в дальнейшем к проворачиванию вкладышей. Измерения вкладышей с натирами показали, что они деформированы по образующей, что обуславливает форму площади натиров и прижогов [26, 112, 190].

Изменения соосности постелей блока цилиндров, которые происходят в процессе работы двигателя, обусловлены действием динамических нагрузок, перегревом опор блока цилиндров, вследствие граничных условий

смазки в подшипниках скольжения коренных шеек коленчатого вала и т.д. [14, 39, 123].



Рис. 1.14. Износ постели блока в результате перегрева сопряжения и проворачивания коренного подшипника

Анализ результатов замеров постелей блоков двигателей семейства КамАЗ, проведенных в лаборатории кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» СГТУ имени Гагарина Ю.А., в ООО «Саратовский автоцентр КАМАЗ», г. Саратов показывает, что несоосность опор блока цилиндров более чем в 3 раза превышает отклонения допустимые техническими условиями завода изготовителя. При работе двигателя с такими отклонениями в опорных поверхностях базовых деталей ресурс силового агрегата снижается и составляет 20...40% от ресурса нового двигателя.

При несоосности коренных опор 0,05 мм динамическая нагрузка на коленчатый вал увеличивается в 1,8-2 раза, а следовательно, увеличивается и интенсивность изнашивания коренных вкладышей [14, 39].

В работах проф. Ф.Н. Авдонькина [4, 5] обоснованы зависимости интенсивности изнашивания от величины износа:

$$\alpha_1 = \alpha_{01} + bS_1; \quad (1.16)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{02} + bS_2, \quad (1.17)$$

где α_1, α_2 – соответственно интенсивность изнашивания в вертикальной и горизонтальной плоскостях, мкм/тыс.км; α_{01}, α_{02} – интенсивность изнашивания в конце приработки, мкм/тыс.км; b – изменение интенсивности изнашивания за единицу износа, 1/тыс.км; S_1, S_2 – износ, мкм.

Запишем выражение для интенсивности овализации $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2, \quad (1.18)$$

или

$$\Delta\alpha = \alpha_{01} - \alpha_{02} + bS_1 - bS_2 = \Delta\alpha_0 + b(S_1 - S_2), \quad (1.19)$$

т.е. интенсивность овализации $\Delta\alpha$ в процессе изнашивания возрастает прямо пропорционально величине овальности. Это приводит к увеличению овальности коренной опоры и ухудшению условий монтажа коренного вкладыша после замены, поэтому при проведении капитального ремонта двигателя необходимо промерять не только размеры и форму постелей блока, но и их соосность, и если необходимо, – устранять макрогеометрические отклонения в коренных опорах.

1.3.3. Анализ дефектов шатунов

Шатун двигателя КамАЗ (деталь 740.1004045), кованный, изготавливается из стали 40ХН2МА, твердость НВ 245...285, стержень шатуна выполнен в виде двутавра.

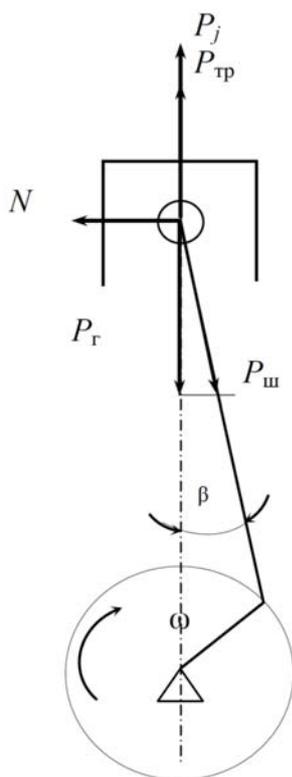


Рис.1.15. Схема сил, действующих на шатун:
 P_g – сила давления газов;
 P_j – сила инерции; $P_{тр}$ – сила трения поршневой группы;
 $P_{ш}$ – сила, действующая вдоль оси шатуна;
 N – боковая сила

В верхней головке запрессована стале-бронзовая втулка, а в нижней фиксируются биметаллические вкладыши.

В верхней и нижней головках шатуна условия работы разные.

Шатун воспринимает переменные по величине и направлению газовые и инерционные нагрузки, которые носят ударный характер (рис.1.15) [26].

В связи с этим к шатуну, как к одной из ресурсопределяющих деталей агрегата, предъявляют высокие требования по жесткости и прочности.

Значительных износов поверхностей шатуна, деформации при нормальной работе не происходит. В случае аварийного разрушения шатуна возможны повреждения блока цилиндров, деформации коленчатого и распределительного валов.

Возможные повреждения шатуна в процессе работы представлены в табл.1.9, схематически они показаны на рис. 1.16 [26], данные дефекты приводят выбраковке шатуна.

Втулка верхней головки шатуна изнашивается в плоскости оси шатуна, в направлении действия газовых сил.

Втулку верхней головки шатуна при ремонтных работах меняют, нижнюю головку растачивают под ремонтный размер 85,5мм, больше растачивать нельзя из-за близкого расположения к растачиваемой поверхности крепежных болтов [7].

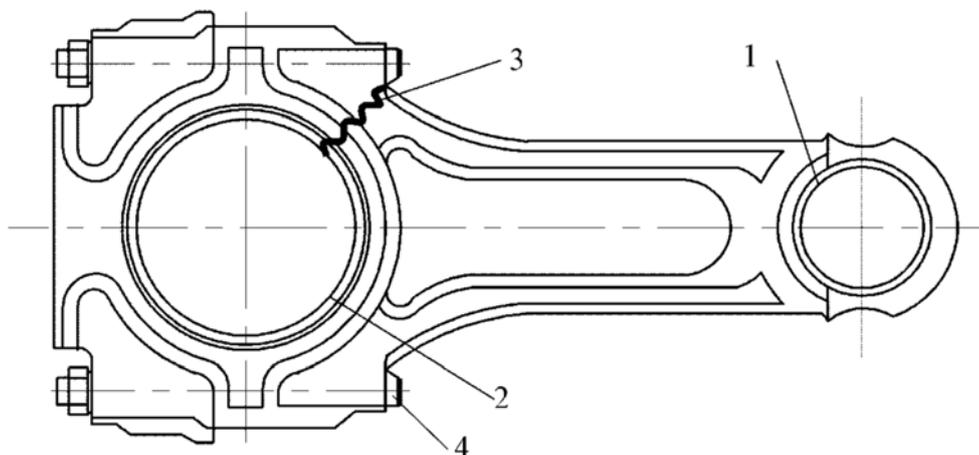


Рис.1.16. Схема основных повреждений шатуна (номера по табл. 1.10) [26]

Износ поверхности под втулку в верхней головке шатуна образуется вследствие фреттинг-коррозии, микроперемещений втулки в верхней головке под действием динамических нагрузок [26].

В отдельных случаях разрушение шатуна (рис.1.17) происходит из-за некачественной механической обработки поверхностей шатуна в процессе изготовления (задиры на рабочей поверхности, отсутствие радиусов при переходе с разных диаметров и др.), и носят производственный характер. Данные дефекты технологические и являются резервами в повышении качества шатуна.

Т а б л и ц а 1.10

Распределение повреждений шатуна

№ п/п	Наименование повреждений	%
1	Повышенный износ втулки верхней головки шатуна (более 50 мкм)	35
2	Задиры, прижоги на нижней головке шатуна	1,8
3	Усталостное разрушение тела шатуна	0,4
4	Обрыв шатунных болтов	0,2

Исследования поломанных шатунов показывают, что разрушения шатунов в процессе эксплуатации часто происходят у галтели (концентратор напряжений) отверстия шатунного болта (рис. 1.17).

При проведении капитальных ремонтов двигателей в ЗАО «Ремдизель» в среднем выбраковываются до 7% шатунов, у 28% шатунов производят

замену изношенной втулки верхней головки шатуна на новую, с последующей расточкой под номинальный размер, годными считаются около 65% шатунов [123].

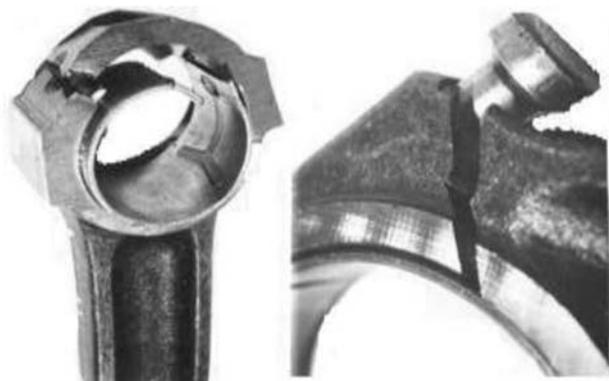


Рис.1.17. Усталостные разрушения по верхней головке шатуна и цековке под головку блока

с М12 до М13, изменили его посадку в отверстии шатуна. Эти и другие конструктивно-технологические решения позволили повысить его жесткость [7, 123].

Совершенствование технологий изготовления шатунов в ОАО «КАМАЗ» и выбор конструктивно-технологических решений по повышению надежности шатунов позволили снизить количество их поломок, имеющих часто усталостный характер [224].

Изменения в новом (усиленном) шатуне заключались в том, что увеличили радиус перехода от стержня к нижней головке шатуна с 108 мм до 130 мм, увеличили диаметр резьбы шатунного болта

1.3.4. Анализ дефектов турбокомпрессоров

Задачи, связанные с повышением литровой мощности двигателя, снижением удельной массы, улучшением его экологических факторов, решаются при форсировании силового агрегата с помощью системы газотурбинного наддува. Доля современных автотракторных дизелей, оснащенных турбокомпрессорами, уже превышает 70% и постоянно возрастает.

На двигателе КамАЗ работают два турбокомпрессора модели ТКР-7С или ТКР7-Н, схематично они изображены на рис.1.18, 1.19.

Характеристики обеих моделей турбокомпрессоров представлены в табл 1.11 [16].

Турбокомпрессор ТКР 7С-6 (рис. 1.18), агрегат, содержащий турбинную и компрессорную части, которые соединены с корпусом подшипникового узла. Вал ротора турбокомпрессора, в турбинной части, приводится во вращение от энергии отработавших газов, в компрессорной части колесом компрессора происходит сжатие и подача воздуха в над поршневое пространство. Частота вращения вала ротора доходит до 100 тыс.об/мин и более (таблица 1.11), поэтому к этому узлу предъявляют большие требования по балансировке. Вал ротора в сборе с компрессорным колесом балансируются динамически [16].

Таблица 1.11

Технические характеристики турбокомпрессоров

Наименование параметра	Параметры турбокомпрессоров	
	ТКР7Н -1	ТКР7С
Диапазон подачи воздуха через компрессор, кг/с	0,05...0,18	0,05...0,2
Давление наддува (избыточное) при нормальной мощности двигателя, кПа (кгс/см ²), не менее	60 (0,6)	80 (0,8)
Частота вращения ротора при номинальной мощности двигателя, мин ⁻¹	80000...90000	90000...100000
Температура газов на входе в турбину, К (°С)		
- допускаемая в течение 1 часа	973 (700)	1023 (750)
- допускаемая без ограничения по времени	923 (650)	973 (700)
Давление масла на входе в турбокомпрессор, при температуре масла 80-95 ⁰ , кПа (кгс/см ²)		
- при частоте вращения коленчатого вала 2200 мин ⁻¹	294-442 (3,0-4,5)	294-442 (3,0-4,5)
- при частоте вращения коленчатого вала 600 мин ⁻¹ не менее	98 (1,0)	98 (1,0)

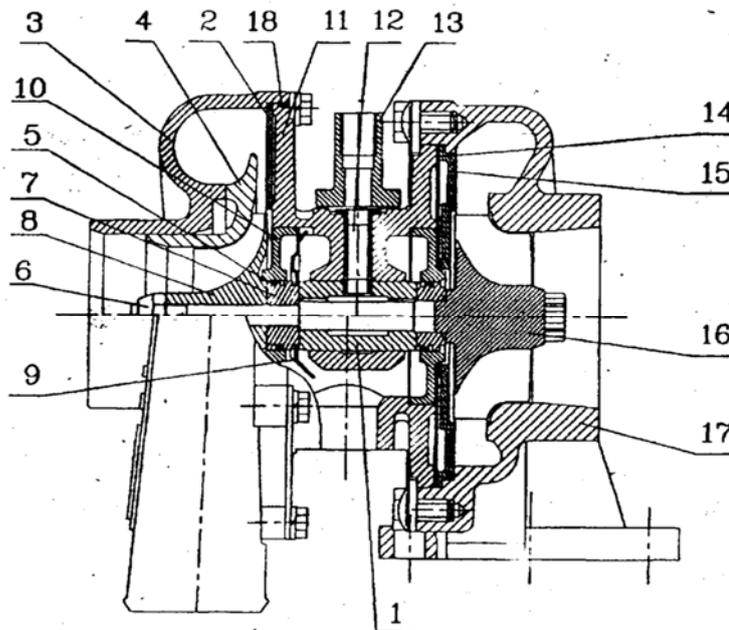


Рис.1.19. Турбокомпрессор ТКР 7Н:

1 – подшипник; 2 – экран; 3 – корпус компрессора; 4 – диффузор; 5, 18 – уплотнительные кольца; 6 – гайка; 7 – маслоотражатель; 8 – колесо компрессора; 9 – маслосбрасывающий экран; 10 – крышка; 11 – корпус подшипника; 12 – фиксатор; 13 – переходник; 14 – прокладка; 15 – экран турбины; 16 – колесо турбины; 17 – корпус турбины

Форсирование двигателей турбонаддувом повлияло на надежность силового агрегата из-за недостаточной надежности турбокомпрессоров [16].

Из анализа исследований отказов силового агрегата КамАЗ-740.11-240 Евро-1 (таблица 1.12) видно, что по затратам на ресурсопределяющие элементы и по количеству отказов второе место приходится на турбокомпрессоры [7, 16, 131, 202].

Т а б л и ц а 1.12

Распределение отказов двигателей КамАЗ-740.11-240 Евро-1

№	Наименование элементов	Доля отказов, %	Затраты, %	
			на запчасти	трудовые
1	Цилиндропоршневая группа	7,6	14,7	14,2
2	Коленчатый вал и вкладыши	8,1	59,7	54,7
3	Турбокомпрессоры	25,9	17,1	2,4
4	Система охлаждения	7,4	5,3	9,3
5	Система питания	36,2	2,1	11,5
6	Система смазки	14,8	1,1	7,9

Затраты на восстановление работоспособности системы турбонаддува двигателя в среднем составляют 12% от общих затрат на восстановление работоспособности всего силового агрегата. Конструктивно-технологические решения по повышению ресурса турбокомпрессоров, разрабатываемые ОАО «КАМАЗ», позволили несколько снизить количество отказов системы турбонаддува двигателя [16, 192, 198]. Тем не менее, вопросы, связанные с надежностью турбокомпрессора и влияние его на работу двигателя в целом, остаются актуальными.

Установка турбокомпрессора (ТКР) приводит к росту температурной напряженности всего силового агрегата, сам ТКР имеет повышенные температуры работы, что снижает качество масла в системе смазки двигателя (уменьшается количество присадок, щелочность, масло загрязняется, коксуется). В связи с этим, необходимо модернизировать систему смазки турбокомпрессоров, проводить дополнительную очистку масла, повысить производительность масляного насоса, использовать масла более высокого качества [16].

Загрязненность масла твердыми закоксовавшимися частицами приводит к износу плавающих подшипников, как по наружному диаметру, так и по внутреннему (гидроабразивное изнашивание) (рис.1.20), что увеличивает радиальный люфт вала ротора до 0,5 мм и более, касанию крыльчаток турбины и компрессора о корпус ТКР, их износу, появлению дисбаланса вала ротора, потере герметичности в лабиринтном уплотнении подшипникового узла и выходу ТКР из строя.

Высокая теплонапряженность элементов турбокомпрессора особенно сказывается при остановке двигателя без работы его на холостых оборотах. Подшипниковый узел перестает охлаждаться маслом, температура с турбинной части распространяется на подшипниковый узел и достигает критических значений 250°C и выше (происходит тепловой удар), остатки масла коксуются и образуют твердые частицы [15,16, 18].



Рис.1.20. Износ наружного диаметра подшипника

Таким образом, для снижения негативного влияния высокой теплонапряженности турбокомпрессора на его элементы необходимо снижать температуру ТКР путем работы автомобиля на холостых оборотах перед остановкой двигателя.

Для повышения долговечности двигателя необходимо диагностировать и по необходимости восстанавливать работоспособность элементов силового агрегата.

При проведении технического обслуживания автомобиля рекомендуется провести диагностику турбокомпрессора по выбегу вала ротора после остановки двигателя, по величине осевого и радиального зазоров в подшипниковом узле [16, 150, 192, 249, 269].

С целью определения затрат на обеспечение работоспособности системы турбонаддува и других ресурсопределяющих элементов двигателя в процессе эксплуатации были проведены статистические исследования [16, 150].

Исследования проводились на автотранспортных предприятиях Саратовской, Самарской, Пензенской и Тамбовской областей с 2003 по 2007 год, в результате были собраны данные по техническому состоянию 330 двигателям КамАЗ, количеству выхода их из строя и величине затрат на поддержание их в работоспособном состоянии [150].

Анализ исследований (таблица 1.13) показывает, что 6,91 % всех неисправностей силового агрегата, приходится на работу системы турбонаддува двигателя и в частности турбокомпрессора [16].

Таблица 1.13

Распределение показателей надежности по элементам силового агрегата

Наименование элементов силового агрегата	Доля отказов, %	Средняя наработка на отказ, км	Коэффи- циент вариации	Затраты на ремонт, руб.			
				За услуги		На запчасти	
				Среднее значение	Коэфф -нт вариации	Среднее значение	Коэфф-нт вариации
1. Система питания и выпуска	22,59	35990	1,027	2331	0,947	3722	0,983
2. Подшипники коленчатого вала, шатун	17,87	36586	1,193	5703	0,259	53458	1,061
3. Цилиндропоршневая группа	13,05	36670	1,273	4322	0,712	16934	0,714
4. Система охлаждения	10,42	14243	1,073	532	0,673	1753	1,012
5. Головка блоков цилиндров	7,89	35613	1,102	1416	0,498	2385	0,593
6. Турбокомпрессор	6,91	41550	1,099	1459	1,025	11955	0,974
7. Коробка передач	5,81	70261	0,927	3899	0,235	5659	0,238
8. Газораспределительный механизм	4,50	36627	1,417	750	0,342	1745	0,508
9. Система смазки	3,95	29526	0,887	572	0,525	3310	0,651
10. Сцепление	3,51	62342	0,741	2105	0,357	1107	0,458
11. Стартер	1,86	77132	0,611	686	0,295	2826	0,402
12. Генератор	1,64	89520	0,538	672	0,426	1008	0,311
Силовой агрегат в целом	100	23140	1,021	1613	1,138	11272	2,414

Анализ проведенных исследований [16, 131, 150, 275] говорит о внезапном характере проявляющихся отказов в турбокомпрессорах (рис. 1.21).

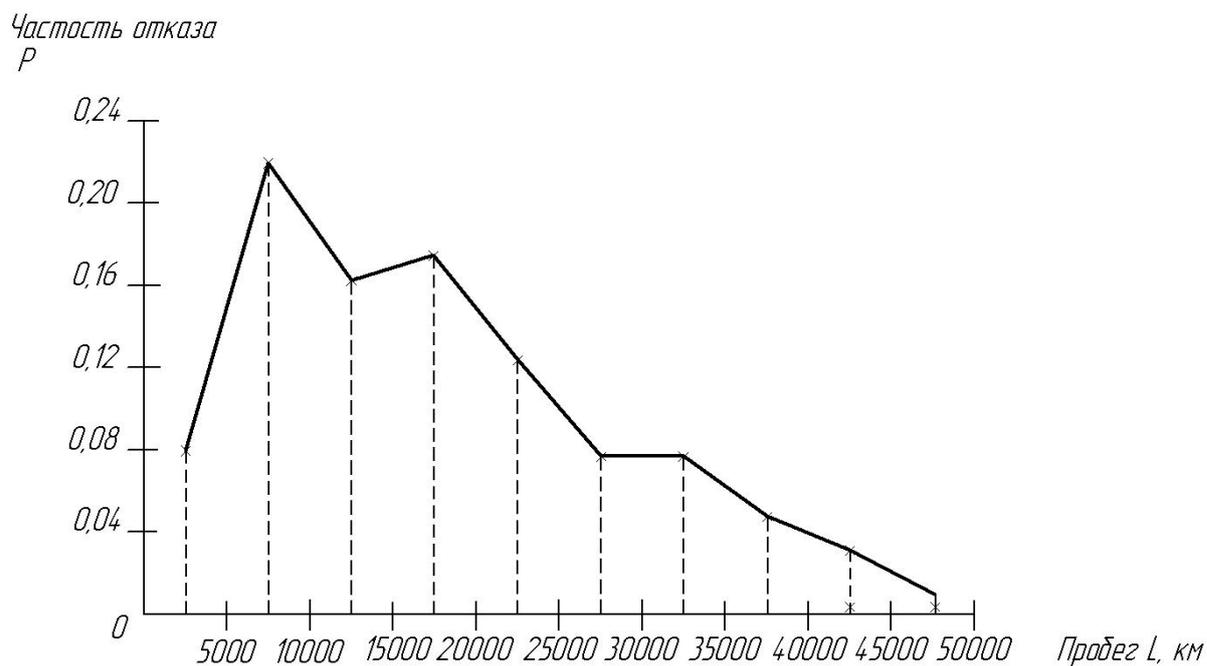


Рис. 1.21. Распределение наработки на отказ турбокомпрессоров двигателей КамАЗ 740.30 – 260 в гарантийный период

В табл. 9 приложения 1 приведены причины, вызывающие отказы турбокомпрессора, для визуализации некоторые дефекты показаны на рис. 1.22–1.24.

При попадании постороннего тела в турбинную или компрессорную часть происходит поломка лопаток колес турбокомпрессора, что приводит к дисбалансу вала ротора (рис. 1. 22).



Рис. 1.22. Повреждения лопаток турбинного колеса

Другие дефекты: задиры втулки подшипника вала ротора (~25%), вызванные гидроабразивным изнашиванием вследствие плохой очистки масла и малого давления в системе смазки, повреждения турбинного колеса из-за касания о корпус, обусловлено большим зазором в подшипнике (~10%), рис.1.23, потеря герметичности уплотнительными кольцами, излом колец (~15%), повреждения вала ротора при перегреве (~15%), рис.1.24, закоксовывание проточной части турбины и других деталей (~35%), рис.1.24.



Рис. 1.23. Повреждения турбинного колеса из-за касания о корпус, обусловлено большим зазором в подшипнике



а)

б)

Рис. 1.24. Закоксовывание уплотнительных колец вала ротора – а) и корпуса подшипников – б)

Проведенные исследования показывают, что более 70 % всех отказов, вызванных неблагоприятными условиями эксплуатации, связано с высокой теплонапряженностью деталей турбокомпрессора (перегрев вала ротора

турбокомпрессора, закоксовывание деталей уплотнения и т.д.). Это обуславливает поиск путей снижения теплонапряженности элементов агрегата, что позволит повысить как долговечность турбокомпрессора, так и всего двигателя в целом.

1.4. Обоснование необходимости совершенствования структуры эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КамАЗ

Планово-предупредительная система технического обслуживания, используемая в автотранспортных предприятиях, предназначена для поддержания работоспособности автомобилей и состоит из профилактической составляющей и ремонтной. Применение современных методов диагностирования и предупреждения отказов, а также методов восстановления работоспособности автомобилей позволило снизить затраты на поддержание их работоспособности. Предупреждение отказов автомобилей в среднем в 5 раз дешевле, чем устранение отказов [124, 186].

Форсирование двигателей повлияло на их надежность, и уровень затрат на обеспечение работоспособности этих автомобилей остается достаточно высоким. Повышение параметра потока отказов в процессе эксплуатации обусловлено изменением технического состояния автомобилей (изнашивания, усталостного разрушения, коррозии).

При текущем ремонте производят замену изношенных деталей, а также других деталей, которые близки по своему состоянию к предельному, т.е. замена элементов, состояние которых близко к предельному, носит профилактический характер в виде предупредительного ремонта. Целесообразность его проведения указано многими исследователями [91, 136, 147, 148, 160, 172, 194, 198, 278, 293].

Его преимущество заключается в применении тех видов работ, которые позволят уменьшить число внезапных отказов, что естественно снизит величину удельных затрат на обеспечение работоспособности двигателя.

Однако, предупредительный ремонт пока недостаточно пронормирован.

Исследования по изменению технического состояния автомобилей КамАЗ [124] показывают, что в процессе эксплуатации величина отказов по основным элементам двигателя увеличивается с доверительной вероятностью 0,85–0,97, что говорит о ее значимости. Эти изменения представлены на рис.1.25 [124].

Восстановительные работы, проводимые при текущем ремонте предусматривающие замену изношенных деталей характерны не только для исследуемых автомобилей. В табл. 1.14 [124] представлены отказы некоторых элементов силового агрегата КамАЗ, частота их повторения и другие параметры.

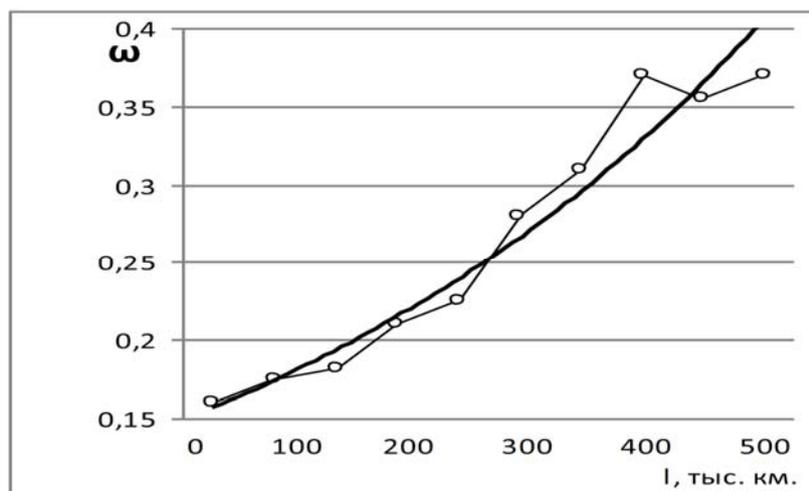


Рис.1.25. Изменение параметра потока отказов ω (отк/тыс. км) двигателей автомобиля КамАЗ в процессе эксплуатации

Т а б л и ц а 1.14

Типичные работы по устранению отказов двигателей автомобилей КамАЗ путем замены деталей и узлов

Наименование отказов и замен	Частота повторения, %	Средняя наработка, тыс.км	Коэффициент вариации
Замена вкладышей подшипников коленчатого вала:	первая	88	0,54
	последующая	64	0,61
Замена поршневых колец:	первая	96	0,58
	последующая	72	0,63
Ремонт топливного насоса высокого давления	21	106	0,64
Капитальный ремонт двигателя:	первый	132	0,48
	последующий	84	0,68
Замена коробки передач:	первая	136	0,51
	последующая	72	0,71
Замена форсунок	28	87	0,62

Рассмотренные в табл. 1.14 мероприятия по устранению отказов не могут быть рациональными, поскольку не отражают реального состояния остаточного ресурса элементов двигателя. Более того в автотранспортных предприятиях при восстановлении работоспособности автомобилей в основном применяют агрегатно-узловой метод, который подразумевает обезличивание ресурсопределяющих элементов. При таком подходе ресурс силового агрегата снижается в среднем на 46%. Это объясняется тем, что при проведении текущего ремонта силового агрегата зачастую

производят замену одной или нескольких изношенных деталей и используют остальные детали, состояние которых близко к предельному, что приводит к уменьшению ресурса всего агрегата [2, 6, 124, 129]. Это взаимовлияние, установленных и оставленных в работе элементов силового агрегата на его ресурс, необходимо учитывать при совершенствовании структуры эксплуатационно-ремонтного цикла (ЭРЦ) двигателя.

Используемая на автотранспортных предприятиях структура эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей не рациональна поскольку не учитывает реальное изменение состояния силового агрегата и целесообразные формы ремонта.

Совершенствование структуры ЭРЦ двигателей целесообразно за счет обоснования рациональной периодичности восстановительных мероприятий, учитывающих изменяющееся состояние элементов двигателя при эксплуатации техники.

В результате проведенных исследований предлагается рациональная структура эксплуатационно-ремонтного цикла силового агрегата КамАЗ, при использовании автомобилей в условиях эксплуатации III категории. Совершенствованная структура ЭРЦ предусматривает:

- проведение предупредительного ремонта при пробеге – 120 тыс. км;
- проведение капитального ремонта при пробеге – 200 тыс. км;
- проведение второго предупредительного ремонта при пробеге – 280 тыс. км.

После этого рекомендуется списание автомобиля (рис. 1.26), при таком подходе средний срок службы автомобиля, при 50 тыс. км в год, в среднем составит 7 лет эксплуатации [124].

Аналогичная структура эксплуатационно-ремонтного цикла для дизелей ЯМЗ предложена проф. А.С. Денисовым [125, 129].

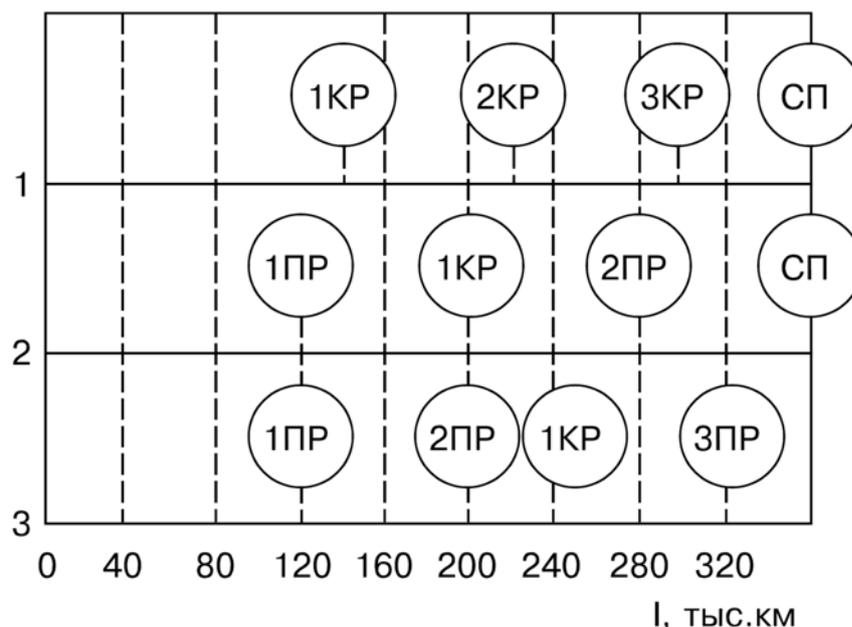


Рис.1.26. Схемы структур обеспечения работоспособности двигателей:
ПР – предупредительный ремонт; СП – списание

Пробеги до ремонтов указаны средними, их необходимо корректировать с учетом диагностирования технического состояния. Здесь необходимо учитывать характеристики состояния силового агрегата при предупредительном и капитальном ремонтах (табл. 1.15) [124].

Т а б л и ц а 1.15

Средние значения показателей технического состояния двигателей

КамАЗ-740 перед предупредительным (ПР) и капитальным (КР) ремонтами

Показатели технического состояния	ПР	КР
Износ шатунных шеек коленчатого вала, мкм	30	45
Износ коренных шеек коленчатого вала, мкм	40	55
Овальность шеек коленчатого вала, мкм	15	25
Прогиб коленчатого вала, мкм	30	50
Износ верхних шатунных вкладышей, мкм	50	60
Износ нижних коренных вкладышей, мкм	90	100
Прогиб шатунных вкладышей по образующей, мкм	50	50
Зазор в шатунных подшипниках, мкм	200	220
Зазор в коренных подшипниках, мкм	240	260
Давление в системе смазки, МПа: при 2600 мин ⁻¹	0,25	0,20
при 600 мин ⁻¹	0,10	0,08
Износ гильз цилиндров в верхнем поясе, мкм	130	200
Овальность гильз цилиндров, мкм	60	80
Радиальный износ верхних компрессионных колец, мкм	130	140
Радиальный износ маслосъемных колец, мкм	60	70
Зазор в сопряжении канавка поршня - верхнее компрессионное кольцо, мкм	250	270
Зазор в сопряжении канавка поршня - маслосъемное кольцо, мкм	100	120
Удельный расход масла на угар в % к расходу топлива	2,0	2,5
Давление впрыска топлива форсунками, МПа	16,5	16,0
Производительность секций ТНВД при частоте вращения кулачкового вала 1300 мин ⁻¹ , мм ³ /цикл	72	70
Отклонение геометрического угла начала подачи топлива секциями ТНВД, град	0,6	0,8
Давление открытия нагнетательного клапана, МПа	0,9	0,9

С учетом повторения выхода из строя элементов силового агрегата (табл. 1.16) и введением коэффициентов повторяемости планирование предупредительного ремонта значительно упрощается [124].

Т а б л и ц а 1.16

Перечень основных деталей двигателей КамАЗ-740, заменяемых при ПР

Наименование деталей	Подлежит	
	замене, %	восстановлению, %
Вал коленчатый	5	15
Гильзы цилиндров	25	—
Поршень	25	—
Палец поршневой	25	—
Шатун	6	37
Прокладки головок блока	85	—
Вкладыши коренные	78	—
Вкладыши шатунные	69	—

Силовые агрегаты автомобилей КамАЗ-Евро моделей 740.11-240, 740.13-260, 740.14-300, 740.30-260, 740.50-360, 740.51-320 имеют конструктивно-технологические и мощностные отличия по сравнению с силовым агрегатом КамАЗ-740. В данных двигателях увеличена мощность за счёт использования турбонаддува или увеличения рабочего объёма. Для повышения долговечности усовершенствована смазочная система: установлен односекционный масляный насос повышенной производительности, установлен теплообменник, повышено давление масла в системе, установлены форсунки для охлаждения поршней маслом. Изменения произошли в системе впуска и фильтрации воздуха, убран центробежный грязеуловитель в коленчатом вале и др.

Эти изменения влияют на ресурс и структуру ЭРЦ двигателя. Для совершенствования структуры ЭРЦ двигателей КамАЗ-Евро необходимы теоретически и экспериментально обоснованные зависимости параметров технического состояния ресурсопределяющих элементов от наработки.

1.5. Выводы, цель и задачи исследования

Проведенный анализ состояния проблемы повышения долговечности автомобильных двигателей в эксплуатации позволяет сделать следующие выводы:

1. Основные затраты и простои в ремонте обусловлены техническим состоянием силовых агрегатов, в том числе их ресурсопределяющих

элементов (подшипники коленчатого вала, шатун, блок цилиндров, турбокомпрессор). Поэтому снижение затрат на обеспечение их работоспособности является актуальной проблемой.

2. По принятой планово-предупредительной системе текущий ремонт выполняется при наступлении отказа. Поэтому текущий ремонт нормируется в удельных единицах т.е. на тыс. км пробега. Это учитывает реальный уровень технической эксплуатации, а не изменение технического состояния элементов автомобиля.

3. Характер отказов силовых агрегатов в процессе эксплуатации постепенный, что обусловлено закономерным изменением показателей диагностирования. Это позволяет нормировать текущий ремонт не только в удельных единицах, но и в периодичности и объему работ.

4. Целесообразность использования методов и средств диагностирования двигателей обусловлено стохастическим изменением диагностических параметров. Это служит основой разработки эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей. При этом используется методика как для базового двигателя КамАЗ–740, но учитываются конструктивно технологические различия двигателей КамАЗ-Евро.

Приведенные выводы позволяют сформулировать цель настоящей работы – повышение долговечности автомобильных двигателей и снижение затрат на обеспечение их работоспособности, путем совершенствования технологических процессов восстановления основных деталей двигателей по их техническому состоянию.

Для достижения поставленной цели предусмотрено решить следующие задачи:

1. Обобщить и развить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки.

2. Обобщить и развить закономерности формирования свойств поверхности деталей при восстановлении.

3. Разработать методологию и измерительный комплекс для определения отклонений размеров и формы рабочих поверхностей основных деталей двигателей, вследствие их напряженно-деформированного состояния.

4. Экспериментально проверить аналитические зависимости показателей технического состояния двигателей от наработки в эксплуатационных условиях и получить их параметры для установления предельного состояния.

5. Сформировать технологические основы восстановления деталей двигателей по их техническому состоянию, с разработкой оборудования и оснастки.

6. Разработать способы функционального тюнинга элементов двигателя, повышающие его долговечность.

7. Усовершенствовать структуру эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей и дать технико-экономическую оценку результатов исследования.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью экспериментальных исследований в работе является проверка реализуемости и оценка эффективности разработанных теоретических положений и технических решений по повышению долговечности автомобильных двигателей.

2.1. Программа и общая методика исследования

В соответствии с поставленной целью и сформулированными задачами работы разработана схема программы и общей методики исследования, которая приведена на рис. 2.1. Она включает в себя анализ состояния проблемы, при этом обращено внимание на проблемную ситуацию не только по литературному обзору, но и на особенности реального состояния изучаемой проблемы в автотранспортных предприятиях (АТП). На основании этого сформулированы задачи исследования, в которых аналитическая часть представлена изменением технического состояния основных элементов двигателя, рассмотрена кинетика предотказного состояния ресурсопределяющих деталей, а также исследована физика процессов формирования металлопокрытий при восстановлении деталей. Экспериментальная часть работы представлена методикой сбора и обработки данных по техническому состоянию элементов двигателя в процессе эксплуатации, разработкой методик и средств измерения параметров, технического состояния элементов двигателя внутреннего сгорания, а также методикой определения параметров поверхностного слоя металлопокрытий при восстановлении деталей. Анализ результатов экспериментальных исследований представлен анализом параметров технического состояния деталей от наработки, а также разработкой методов и средств диагностирования и совершенствованием технологических процессов восстановления ресурсопределяющих деталей и формированием структуры ЭРЦ двигателя. Результатом являются практические рекомендации и технико-экономическая оценка исследований.

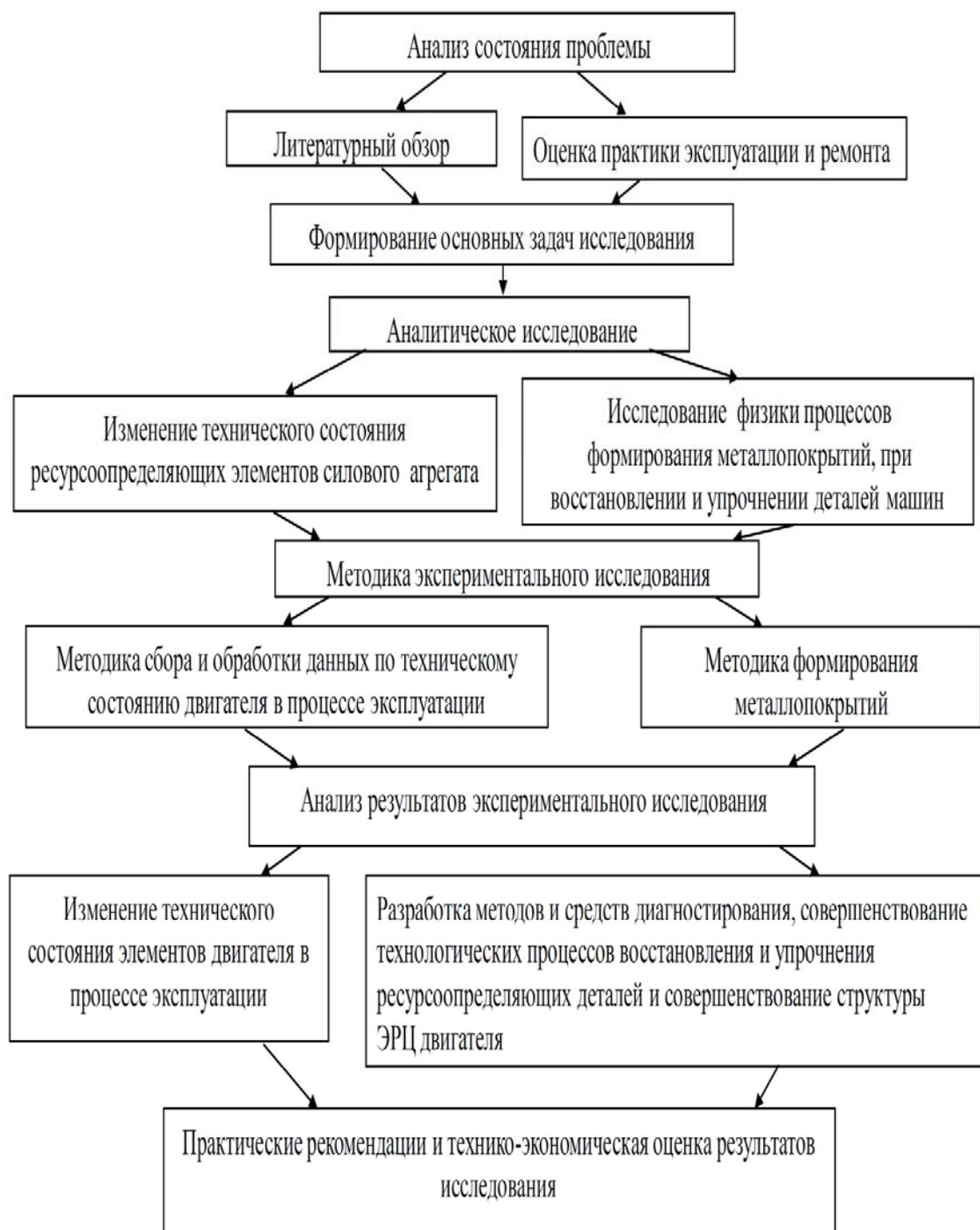


Рис. 2.1. Схема программы и общей методики исследования

2.2. Методика аналитического исследования

В процессе теоретических исследований изучаемой проблемы, были проанализированы условия работы основных элементов форсированных двигателей и их конструктивные особенности. Получены математические модели изменения диагностических параметров рассматриваемых деталей в процессе эксплуатации.

Характер моделей вероятностный, поскольку течение их зависит от различных факторов, в большинстве своем случайных.

На основе ранее проведенного математического моделирования, для определения фактического технического состояния ресурсопределяющих деталей силового агрегата, выполнены эксплуатационные исследования. Исследуемые параметры определялись с использованием метода наименьших квадратов.

Для определения напряженно-деформированного состояния основных деталей двигателя использовали метод конечных элементов (МКЭ), базирующийся на положениях теории упругости и пластичности, он позволяет провести углубленный анализ геометрической формы, включая участки сложной конфигурации, зоны концентрации напряжений и области контактного взаимодействия в сопряжениях. В соответствии с рассматриваемыми положениями объемное напряженное состояние описывается законом Гука [310]:

$$\{\sigma\}^T = [E] \{\varepsilon\}^t, \quad (2.1)$$

где $\{\sigma\}^T = \{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{xz}\}$ – вектор напряжений; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – нормальные напряжения по осям OX, OY, OZ и касательные напряжения соответственно; $\{\varepsilon\}^t = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{xz}\}$ – вектор деформаций; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ и $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ – относительные линейные деформации по направлению осей OX, OY, OZ и угловые деформации соответственно. Матрица упругости при этом будет иметь вид:

$$[E] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\nu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\nu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

матрица упругости,

где $\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$ – постоянная Ляме; $\nu = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль сдвига (в этих

выражениях E – модуль упругости и μ – коэффициент Пуассона материала объекта исследования).

Деформации связаны с перемещениями $\{\varepsilon\}^T = [D]^T \{q\}$, где $[D]^T$ – матрица дифференцирования:

$$[D]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}; \quad (2.3)$$

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} - \text{вектор перемещений.}$$

Для построения трехмерной конечно-элементной модели деталей, с целью определения перемещений, напряжений, создавали твердотельную модель с последующей генерацией конечно-элементной сетки определенной геометрической формы (тетраэдры). Признаки конечного элемента характеризуют свойства материала (упругие характеристики, плотность, толщину элемента), параметры внешней нагрузки, действующей на грани элементов, расположенных на границе. Вычисление осуществляли с помощью прикладного пакета программы – АРМ Win Machine 9.7, позволяющей определять усилия, действующие на каждый конечный элемент.

Перед решением полученной системы уравнений задавали кинематические граничные условия, простейшим видом которых является ограничение перемещения детали как одного целого. Для реализации этого условия достаточно ограничить перемещение одного узла в двух направлениях и перемещение любого другого узла в одном направлении [310].

Все виды распределенных нагрузок ЭВМ приводит к эквивалентным узловым усилиям при формировании системы уравнений.

После решения сформированной системы уравнений ЭВМ выполняет расчет деформаций и напряжений в каждом конечном элементе и отображает результаты расчета в виде таблиц перемещений узлов, напряжений в элементах и узлах, полей напряжений детали.

С целью определения результатов исследований, реального состояния исследуемых элементов, разработаны методики определения изменений состояния ресурсопределяющих элементов двигателя: методики стендовых исследований и методики исследования в процессе работы силового агрегата (моторные, эксплуатационные). На основе результатов экспериментальных исследований разрабатываются практические рекомендации по совершенствованию технологии восстановления ресурсопределяющих элементов двигателя. По результатам внедрения предложенных методов повышения долговечности форсированных двигателей приводится технико-экономическая оценка результатов исследований.

2.3. Методика измерения деталей

Измерение деталей проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 14846-81 [87].

Контроль геометрических параметров исследуемых элементов осуществлялся стандартным мерительным инструментом согласно требованию РД 50-90-86 [261] и ГОСТ 8.051-81 [89].

Для измерения соосности постелей блока двигателя КамАЗ было изготовлено специальное приспособление (патент № 104691) [236], внешний вид которого и схема измерения соосности приведены на рис. 2.2.

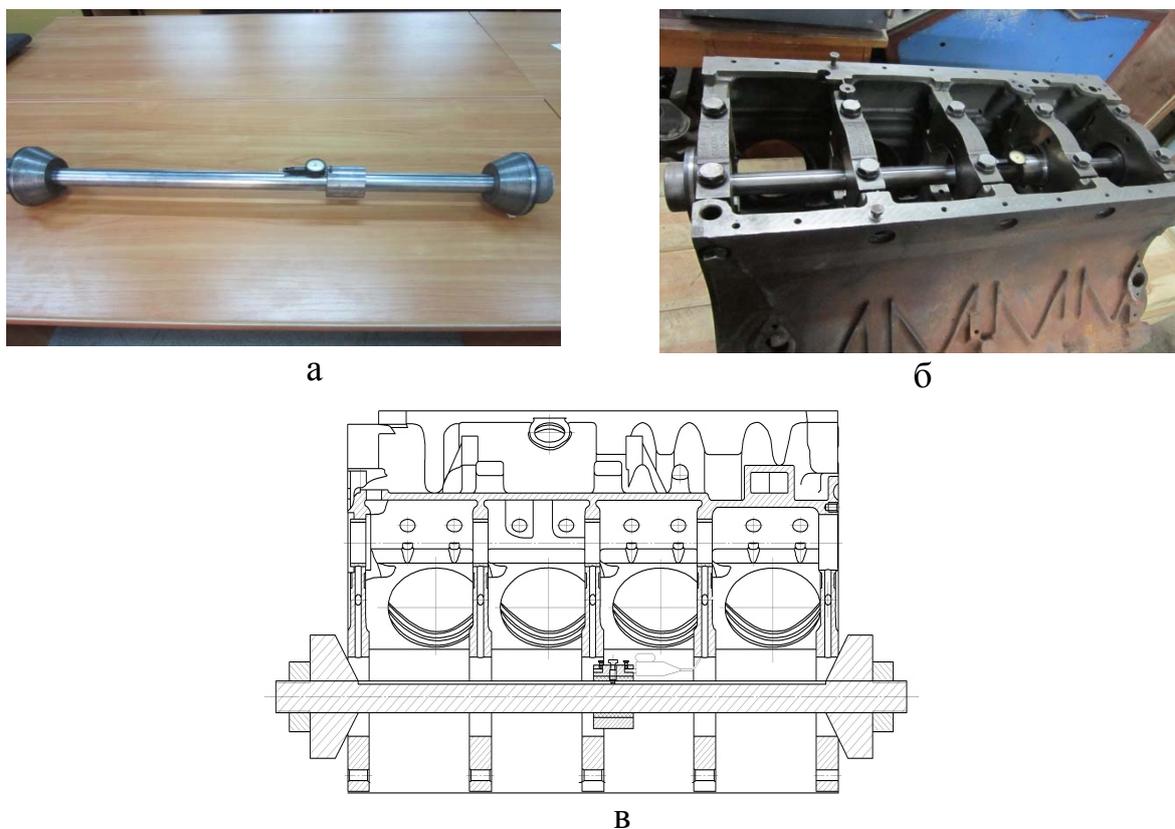


Рис. 2.2. Внешний вид приспособления (а), базирование в опорах (б) и схема измерения соосности постелей блока двигателя КамАЗ (в)

Данное приспособление базируется по торцевой поверхности отверстий коренных опор с помощью самоцентрирующихся конусных шайб (рис. 2.2). Измерение проводили с помощью индикатора часового типа, с ценой деления 1 мкм, закрепленного на втулке, которая имеет возможность перемещения по валу, вдоль измеряемой оси. Измерение проводили следующим образом: выставляли индикатор на 0 с натягом; перемещая втулку с индикатором вдоль измеряемой оси, фиксировали показания прибора на каждой опоре, затем, поворачивая вал с втулкой на 45 градусов,

повторяли измерения, измеряли отклонение от номинального размера по двум поясам в четырех плоскостях. При отклонении размеров более чем на 0,03 мм блок двигателя отправляли на восстановление.

Чтобы избежать смещения втулки с измерительным инструментом по диаметру вала, по всей длине вала отфрезерован паз, в который входит центрирующий винт, закрепленный во втулке.

Измерения геометрических отклонений размеров и формы шатуна осуществлялось изготовленным специальным устройством (патент РФ № 68755) [26, 239], внешний вид которого и схема измерения отклонений приведены на рис.2.3, 2.4.



Рис. 2.3. Приспособление для определения прогиба стержня шатуна и корсетности нижней головки шатуна (внешний вид)

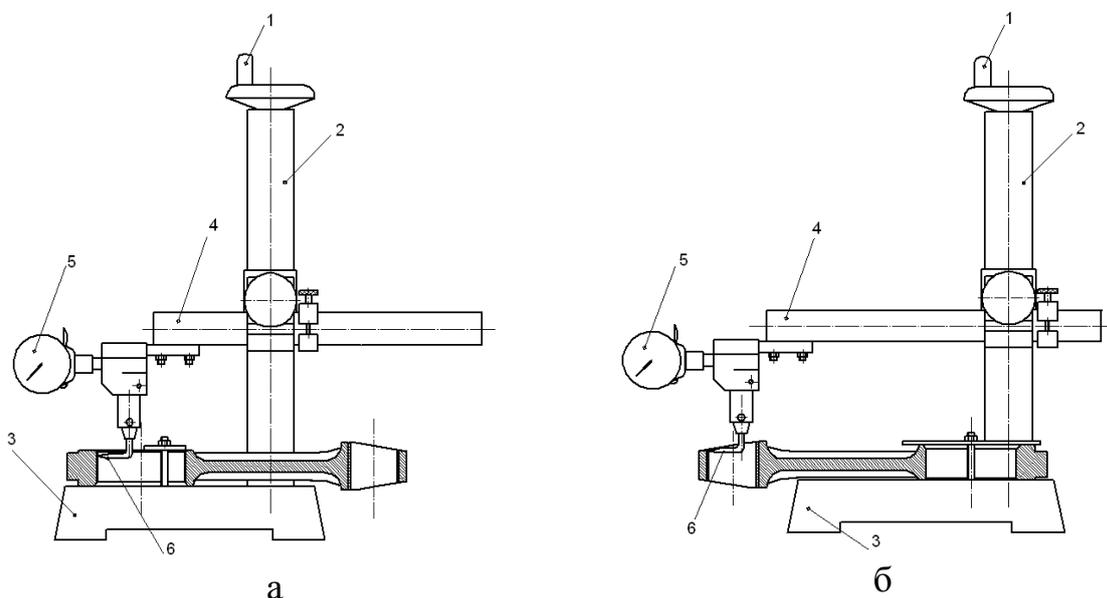


Рис. 2.4. Схема определения корсетности (а) и деформации (б) стержня шатуна на приспособлении

Измерение каждого пояса измеряемой поверхности производилось 5 раз, и в таблицы данных вносились средние значения [26]. Измерения

проводились в соответствии с ГОСТ 8.050-73 [88]. Погрешности измерений не превышали допустимые значения по ГОСТ 8.051-81 [89].

При определении корсетности (отклонение образующей поверхности от прямолинейности) устройство работает следующим образом (рис. 2.4, *a*):

- шатун базируется по торцовой поверхности нижней головки и закрепляется на приспособлении;
- вращением рукоятки 1 опускаем индикатор, закрепленный на штанге 4, до касания измерительным наконечником 6 поверхности отверстия нижней головки шатуна;
- выставляем шкалу индикатора на ноль;
- проводим измерения отверстия, опуская штангу 4 вращением рукоятки 1;
- проверяем отклонения образующей поверхности отверстия от прямолинейности.

При определении деформации стержня шатуна устройство работает следующим образом (рис. 2.4, *б*):

- шатун базируется по торцовой поверхности нижней головки и закрепляется на приспособлении;
- вращением рукоятки 1 опускаем индикатор, закреплённый на штанге 4, до касания измерительным наконечником 6 поверхности отверстия верхней головки шатуна;
- выставляем шкалу индикатора на ноль;
- проводим измерения деформации стержня шатуна, опуская штангу 4 и закрепленный на ней стрелочный индикатор часового типа, вращением рукоятки 1;
- отклонение стрелки индикатора более 0,06 мм говорит о деформации стержня шатуна, превышающей допустимое значение, установленное заводом-изготовителем [26].

2.3.1. Методика оценки состояния турбокомпрессоров

С целью определения характера дефектов турбокомпрессоров, проявившихся в процессе эксплуатации, исследовались турбокомпрессоры ТКР7Н-1, ТКР7С-1, возвращенные по рекламации в ЗАО «Ремдизель», ОАО «Завод двигателей» г. Набережные Челны, ООО «Саратовский автоцентр КАМАЗ» г. Саратов.

Исследования проводили в лаборатории испытаний двигателей ОАО «Завод двигателей», ПК «Турбодизель» г. Набережные Челны, в лаборатории кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» СГТУ им. Гагарина Ю.А.

Фиксировали наличие потеков масла в компрессорной и турбиной улитках, легкость вращения вала ротора турбокомпрессора, касание крыльчаток ротора с корпусом. Инструментально измеряли время выбега вала

ротора, величину износа элементов подшипникового узла и вала ротора. Для оценки деформирования корпуса подшипника, турбокомпрессоров ТКР7Н-1, относительно $\varnothing 26$ крышки со стороны компрессора использовали результаты, выполненные в [123]. Измерения проводили на специальном приспособлении (рис. 2.5), с мерительным инструментом (индикатором часового типа).



Рис. 2.5. Установка для измерения биений поверхностей корпуса подшипников

Средние значения измеряемых параметров находились в пределах 10% при доверительной вероятности 0,8-0,95, что соответствует точности статистической оценки, принятой в инженерных замерах.

Обработка результатов исследования проводилась на основе методов теории вероятности и математической статистики [328] с применением персональных компьютеров.

2.3.2. Методика измерения температуры элементов турбокомпрессоров

Исследования проводили на испытательной станции НТЦ ДРиВНР ОАО «КАМАЗ». С целью определения значений температур в исследуемых точках, в корпусе турбокомпрессора были вмонтированы 13 температурных датчиков (рис.2.6) с фиксацией значений температур на записывающем устройстве [123].

В результате термометрирования базового (серийного) турбокомпрессора получено температурное поле при различных режимах работы [123].

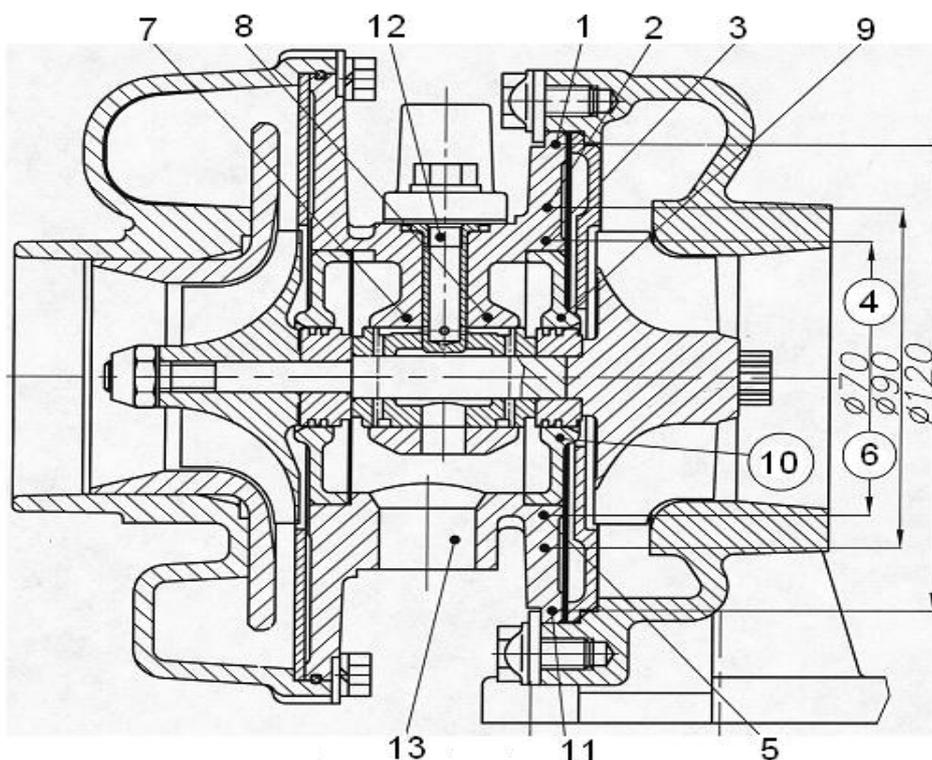


Рис. 2.6. Места расположения температурных датчиков на турбокомпрессоре

2.3.3. Методика проведения испытаний автономной системы смазки турбокомпрессора

Испытания проводили в лаборатории испытания двигателей завода двигателей ОАО «КАМАЗ», бокс №135, цех №054 (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Лаборатория испытания двигателей завода двигателей ОАО «КАМАЗ»

При проведении испытаний автономной системы смазки турбокомпрессора фиксировали параметры работы турбокомпрессора со штатной и автономной системами смазки. Одними из ресурсопределяющих факторов

турбокомпрессора являются температура подшипникового узла, а также динамика ее изменения по времени. Для определения этих параметров использовали цифровой мультиметр модели DT 9208A с термоэлектрическим датчиком.

Исследования проводили на двигателе КамАЗ 740.64 – 420, заводской номер №2563993, установленном на стенде HORIBA (рис. 2.8), заводской номер №2000142955, инвентарный №241331. Во время испытаний двигатель и автономная система смазки работали на масле ЛУКОЙЛ Супер 15 W 40 экспл. класс API CF-4/SG плотностью $\rho = 0,887 \text{ г/см}^3$, температура вспышки $t_{\text{всп}} = 205^\circ\text{C}$, щелочное число $s = 8,5 \text{ мг KOH/1г масла}$, максимальная зольность сульфатная $z = 1,5\%$, массовая доля активных элементов Ca/Zn 0,24-0,29/0,10-0,12 %, вязкость кинематическая при 100°C $\eta = 12,5-16,3 \text{ мм}^2/\text{с}$.



Рис. 2.8. Испытания автономной системы смазки турбокомпрессоров на стенде HORIBA

Порядок испытаний:

1. Перед пуском двигателя включали автономную систему смазки. Фиксировали давление масла в магистрали у входа в турбокомпрессор.

2. После запуска двигатель прогревали до рабочей температуры: обороты коленчатого вала $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$, развиваемая мощность $N = 220 \text{ л.с.}$, нагрузка на двигатель $P = 50\%$.

3. Прогревали до температур:

выхлопных газов $t_{\text{выкл}} = 420^\circ\text{C}$, температура масла $t_{\text{м}} = 98^\circ\text{C}$.

4. После прогрева двигателя до заданных параметров снижали частоту вращения коленчатого вала до $n = 600 \text{ мин}^{-1}$, а затем осуществляли останов двигателя и снятие показателей.

2.4. Методика электрохимических исследований

Цель исследований:

определить условия формирования электролитических железных покрытий с высокими адгезионными свойствами покрытия с основой и с

равномерным распределением физико-механических свойств и толщины покрытия по восстанавливаемой поверхности;

определить условия формирования на шейках коленчатых валов электролитических медных покрытий, играющих роль твердой смазки, предотвращающих процессы схватывания при граничных условиях трения в сопряжении шейка-вкладыш.

Для оценки электрохимического состояния поверхности образца, влияния температуры и разреженной среды на кинетику электроосаждения железа в начальный период катодной поляризации использован метод поляризационных измерений [56].

Схема установки представлена на рис. 2.9. Исследования проводятся в стеклянной герметизированной электрохимической ячейке ЯСЭ–2 (ТУ 2550). В качестве электрода сравнения используется насыщенный хлор-серебряный электрод ЭВЛ-1МЗ, в качестве материала вспомогательного электрода используется сталь 3 (ГОСТ 380–71). Образцы (рабочий электрод) изготавливаются из стали 45 (ГОСТ 1050–74). Конструкция исследуемого электрода соответствует общепринятым требованиям. Площадь исследуемой поверхности $0,5 \text{ дм}^2$ (относительная погрешность измерения 1%). Исследуемая поверхность рабочего электрода располагается вертикально. Поляризация рабочего электрода осуществляется с помощью потенциостата П-5827М в гальваностатическом режиме. Регистрация потенциала как функции от тока $\psi = f(I)$ осуществляется планшетным двухкоординатным потенциометром ПДП–4. Скорость развертки потенциала $4 \times 10^{-3} \text{ В/с}$. Плотность тока катодной поляризации (Дк), А/дм²: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 (относительная погрешность измерения 5%). Величина плотности тока обусловлена исследованием катодного процесса в начальный период электролиза, начинающегося с постепенного, ступенчатого выхода на режим.

Электрохимические исследования проводились при температуре (°С): 20; 55; 80 [56]. Постоянное значение температуры поддерживалось с помощью термостата Вобзера через водяную рубашку электрохимической ячейки. Погрешность установки температуры в термостате определялась с помощью контактного термометра (ГОСТ 9871–61) $\pm 0,2^\circ\text{С}$, температура в ячейке измерялась ртутным термометром (ГОСТ 215–73 ТЛ–2) с точностью $\pm 0,1^\circ\text{С}$. Герметичность ячейки обеспечивалась шлифованными соединениями с вакуумной смазкой. Разрежение в ячейке создавалось вакуумным насосом через редуктор-баллон (рис. 2.8). Степень разрежения контролировалась вакуумметром ГОСТ 6521–60. Величина разрежения устанавливалась: при температуре 20°С – $2,5 \times 10^3 \text{ Па}$, при 55°С – $1,5 \times 10^4 \text{ Па}$, при 80°С – $4,7 \times 10^4 \text{ Па}$. При выбранных значениях величины степени разрежения давление над электролитом не достигает значения давления насыщенного пара, т.е. наблюдается кипение электролита.

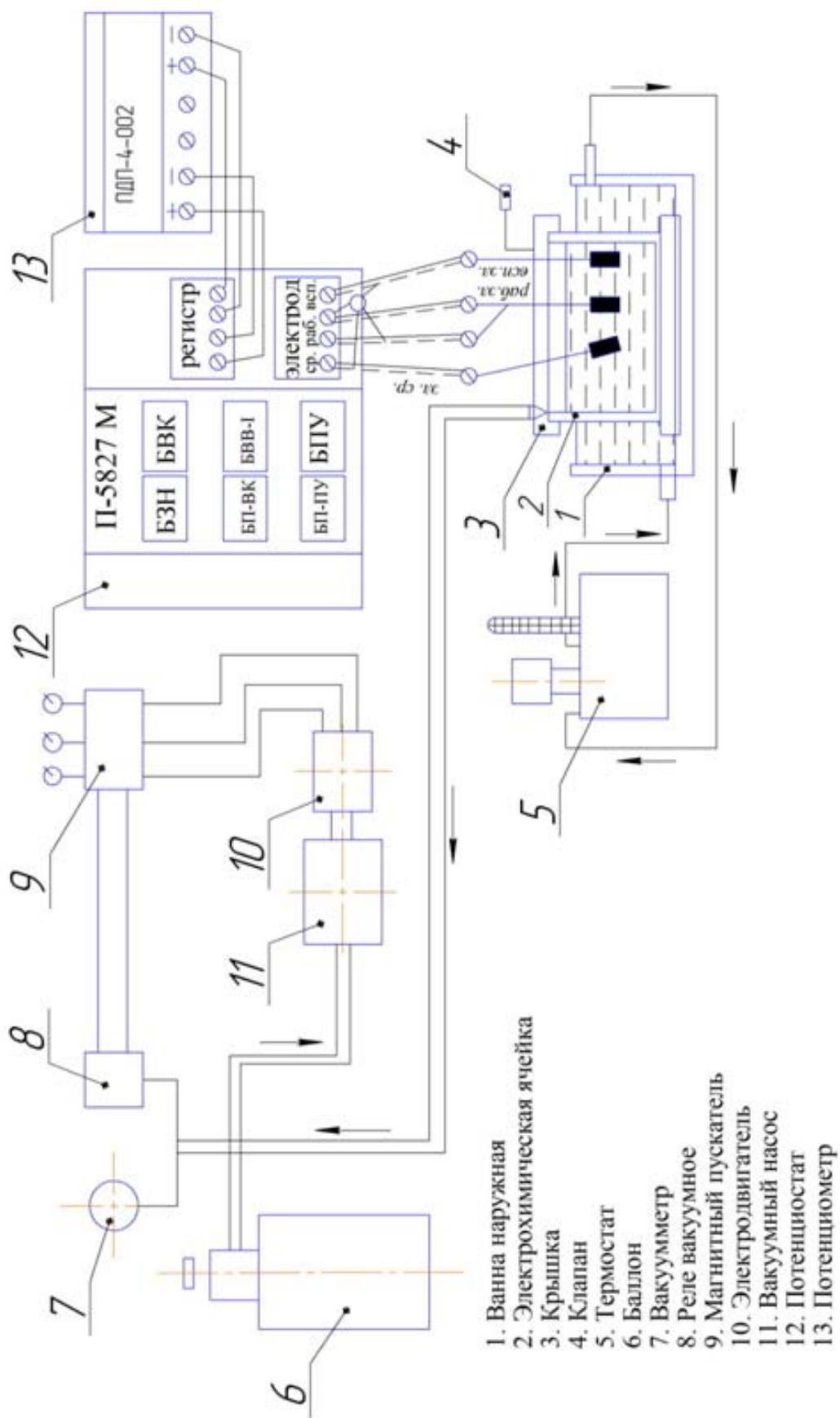


Рис. 2.9. Схема установки исследования электрохимического состояния поверхности образца

Для исследования использовался электролит состава:
хлористое железо ($\text{FeCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$) – 350 ± 1 г/л;
кислота соляная – $1,5 \pm 1$ г/л.

Для приготовления электролита использовались реактивы марки «ч», хлористое железо ГОСТ 4149 – 65, соляная кислота ГОСТ 3118 – 68 и дистиллированная вода. Исследуемая поверхность образца шлифуется и полируется до зеркального блеска пастой ГОИ, затем обезжиривается суспензией «венской извести», тщательно промывается проточной водой. Подготовленный образец анодно травится в 30 %-м растворе серной кислоты (ГОСТ 2184–67) при температуре 20 ± 2 °С, плотности тока 60 А/дм^2 , время обработки 60 секунд.

Анодно обработанный образец промывается проточной водой, сушится фильтровальной бумагой и помещается в ячейку. После достижения равновесного потенциала в исследуемом растворе подается ток поляризации.

Подача тока на ячейку и регистрация изменения потенциала в зависимости от тока проводятся в соответствии с инструкцией по эксплуатации потенциостата П–5827М.

2.4.1. Методика исследования структурных преобразований в электролитическом железе

Нанесение электролитических покрытий на образцы производилось на специальной установке (рис. 2.10) [56].

Образцы изготавливались из стали 45. Поверхность образцов, на которую наносилось электролитическое железное покрытие, равна $0,05 \text{ см}^2$. Условия и технологии нанесения покрытий железа на образцы:

Режим железнения образцов:

- плотность тока – 2, 4, 6, 8, 10 А/дм^2 ;
- температура электролита – 53 °С;
- степень разрежения в ячейках – 75...80%.

Начальный период электролиза проводился при плотности тока D_k – $0,36 \text{ А/дм}^2$ в течение 10...12 секунд. Затем плотность тока сразу увеличивалась до требуемого значения. На каждом режиме железнилось 3 образца.

Выход железа по току определялся весовым методом путем взвешивания образцов до и после железнения.

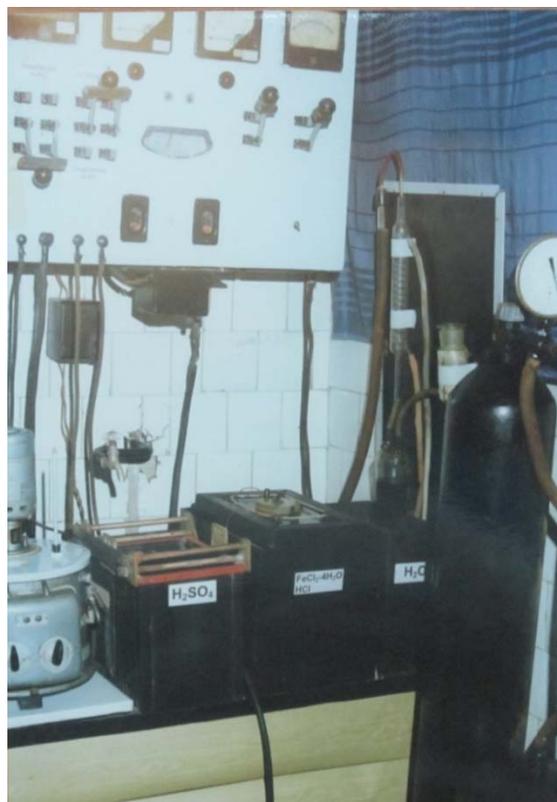


Рис. 2.10. Установка для нанесения электролитических покрытий железа

Взвешивание образцов производилось на аналитических весах АДВ–200 с погрешностью $\pm 0,0001$ г. Значения выхода железа по току подсчитывались по формуле

$$\eta = Q_{\text{ф}}/Q_{\text{т}} - (G_1 - G_2 / C \times I \times \tau), \quad (2.4)$$

где G_1 – средний вес образца, определяемый по результатам трех опытов до железнения, г; G_2 – вес образца после железнения, г; C – электролитический эквивалент железа, г/А ч; I – сила тока, А; τ – продолжительность, ч.

Для изучения структуры и замеров микротвердости осадков железа изготавливались поперечные шлифы. Перед непосредственным фотографированием структуры шлифы протравливались в 5 %-м растворе азотной кислоты. Изучение микроструктуры производилось с помощью микроскопа МИМ – 6 при увеличении $\times 500$.

Замеры микротвердости покрытий железа осуществлялись на приборе ПМП – 3 при нагрузке 50 г. На каждом образце производилось по пять измерений.

2.4.2. Методика исследования адгезионной связи покрытий электролитического железа с основой

Начальный период процесса электролиза проводился при плотности тока $0,5 \text{ А/дм}^2$ в течение 8...12 секунд. Затем плотность тока сразу увеличивалась до соответствующего значения.

Железнение образцов производилось при значениях плотности тока 2, 4, 6, 8 и 10 А/дм^2 , а продолжительность начального периода, соответственно, была равна 24, 12, 8, 6, 5 минутам. После окончания начального периода плотность тока увеличивали постепенно в течение 5 минут до значения 30 А/дм^2 . Общая продолжительность процесса железнения каждого образца составляла 150 минут. Температура электролита была равна $55 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, а степень разреженности в электролитической ячейке поддерживалась в пределах 70–75%. На каждом режиме железнилось 3 образца.

Сдвиг покрытия железа осуществлялся проталкиванием образца через матрицу на гидравлическом прессе. Усиление сдвига (среза) фиксировалось по динамометру пресса с погрешностью – 0,1 Н.

2.5. Методика исследования равномерности распределения толщины электролитического железного покрытия

Образцы для исследований изготавливались из стали 45. Диаметр наружной цилиндрической поверхности образца равен 12 мм, общая длина 120 мм, рабочая длина, на которую наносилось электрическое железо, равна 100 мм, что соответствует величине поверхности, равной $1,2 \text{ дм}^2$. Шероховатость поверхности соответствовала 7-му классу (0,63) [56].

С обоих концов образца на внутренней поверхности были просверлены отверстия, сделаны центровые фаски. В отверстиях нарезалась резьба М5, с помощью которой образец закреплялся на подвесном приспособлении, а с другого конца ввинчивался эбонитовый болт, закрывая торец образца. После железнения толщина осадка измерялась на специальном приспособлении. Схемы замеров образцов и приспособления для измерения изображены на рис. 2.11 и 2.12. Образец устанавливался в центрах, согласно схеме (рис. 2.11), производились измерения с помощью индикатора часового типа, который настраивался по поверхности нанесенного электролитического железа, являющейся измерительной базой.

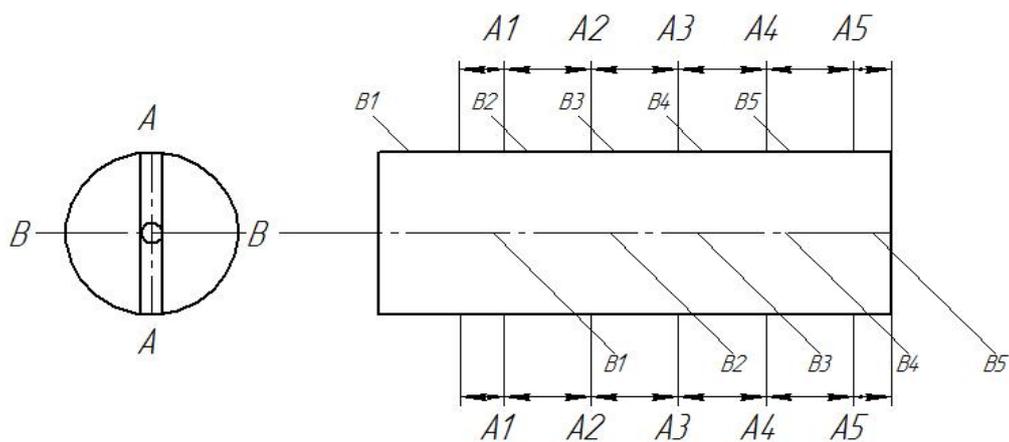


Рис. 2.11. Схема замеров

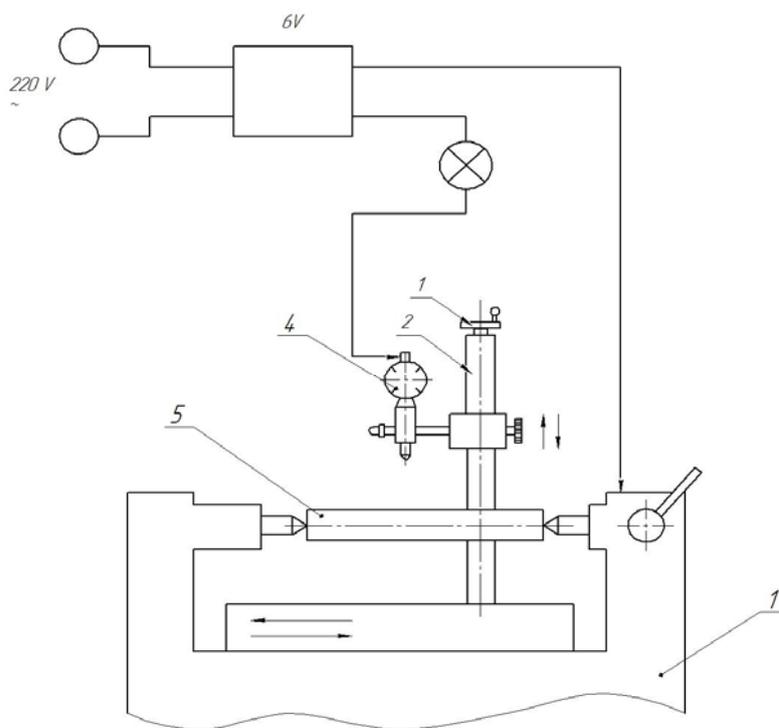


Рис. 2.12. Приспособление для измерения толщины электролитического железного покрытия:
 1 – винт; 2 – стойка; 3 – стол с центрами;
 4 – индикатор часового типа; 5 – образец

Технология нанесения покрытий на образцы:

1. Монтаж образца в крышу ячейки.
2. Обезжиривание образца венской известью.
3. Промывка образца холодной водой.
4. Анодная обработка поверхности образца в 10%-м электролите HCl

Режим обработки:

- температура электролита + 20–25 °С;
- плотность тока $D_a = 10 \text{ А/дм}^2$;
- продолжительность $\tau = 60 \text{ с}$.

5. Промывка холодной водой.

6. Анодная обработка в 30%-м растворе $\text{H}_2 \text{SO}_4$.

Режим обработки:

- температура электролита не более 25°С;
- плотность тока $D_a = 70 \text{ А/дм}^2$;
- продолжительность $\tau = 6\text{--}7 \text{ с}$.

7. Промывка образца в теплой воде $t = 40\text{--}60 \text{ °С}$.

8. Железнение образца.

Состав электролита железнения:

- хлористое железо $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 300 - 350 \text{ г/л}$;
- соляная кислота HCl – 2 – 3 г/л;
- материал анодов – армко-железо.

Режим железнения образцов:

- плотность тока 20 А/дм^2 ;
- температура электролита – 60, 65, 70°С;
- степень разреженности, соответственно, 60–65%; 50–55%; 40–45%.

Начальный период осаждения железа на образцы проводился при плотности тока $D_k = 4 \text{ А/дм}^2$ в течение 10 мин. Затем плотность тока в течение 10 мин увеличивалась до рабочей плотности. На каждом режиме железнилось три образца без разрежения над зеркалом электролита и с созданием разрежения, соответствующие данной температуре.

При исследовании влияния плотности тока на равномерность электролитического железного покрытия эксперимент проводился при плотности тока 10, 20, 30 А/дм^2 :

- температура электролита – 65°С;
- степень разреженности – 50-55 %.

9. Промывка образца холодной водой.

10. Демонтаж образца с подвесного приспособления.

11. Снятие замеров.

2.6. Методика определения трибологических характеристик

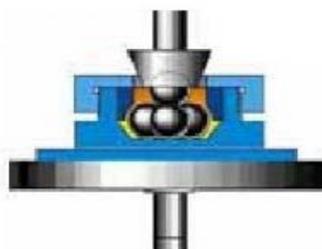
Определение трибологических характеристик трущихся поверхностей проводили на четырехшариковой машине трения, в соответствии с ГОСТ 9490-75. Настоящий стандарт устанавливает метод определения основных трибологических характеристик смазочных материалов:

- несущей способности – по критической нагрузке P_k ;
- предельной нагрузочной способности – по нагрузке сваривания P_c ;
- противоизносных свойств – по диаметру пятна износа $D_{и}$;
- противозадирных свойств – по индексу задира I_z .

Четырехшариковая машина, узел трения которой состоит из трех зафиксированных стальных шариков, лежащих в одной плоскости на которые давит, с изменяющейся нагрузкой, четвертый шарик, схема узла показана на рис. 2.13.



а)



б)

Рис.2.13. Четырехшариковая машина трения – а) и узел трения машины – б)

Три нижних шарика закрепляют неподвижно в чашке машины с испытуемым смазочным материалом. Верхний шарик, закрепленный в шпинделе машины, вращается относительно трех нижних под заданной нагрузкой с частотой вращения (1460 ± 70) мин⁻¹. Проворачивание шариков в процессе испытания не допускается. Шарика диаметром $6 \pm 0,01$ мм по ГОСТ 3722 изготовлены из стали ШХ-15 по ГОСТ 801.

В экспериментах использовались: микроскоп с увеличением до $200\times$, снабженный отсчетной шкалой с ценой деления не более 0,01 мм, секундомер, растворитель по ТУ 38.401-67-108, удаляющий смазочный материал с деталей узла трения и не оставляющий пленки и другие

загрязнения, шабер трехгранный для удаления заусенцев, образующихся вокруг пятен износа на шариках.

Испытание состоит из серии определений. Каждое определение проводили на новых четырех шариках с нанесенным на них медным покрытием, играющим роль твердого смазочного материала.

Для проведения испытания подготовленные шарики закрепляли в шпинделе машины и в чашке для смазочного материала. При испытании смазочный материал заливали так, чтобы шарики были полностью покрыты им. Затем устанавливали чашку со смазочным материалом в машину, плавно прилагая заданную нагрузку, включив электродвигатель.

Время работы машины трения, от начала эксперимента до момента выключения электродвигателя, определялась критической нагрузкой, при которой происходило сваривание, схватывание испытываемых шариков.

При определении критической нагрузки проводили ряд последовательных определений с убывающими или возрастающими нагрузками в соответствии с рядом нагрузок, максимально приближенных к предполагаемой критической нагрузке.

Для материалов, у которых сваривание не наблюдается и момент трения ниже предельного, за нагрузку сваривания принимали нагрузку, при которой образуется пятно износа средним диаметром 3 мм и более.

2.7. Методика стендовых моторных исследований

Для определения параметров полученных аналитических зависимостей были проведены стендовые моторные исследования на двигателе КамАЗ в объеме 1550 часов, в соответствии с методикой, действующей на предприятии.

Использовали испытательный стенд фирмы «AVL», с гидротормозом фирмы «SCHENCK», укомплектованный необходимым оборудованием и приборами, точность которых соответствует требованиям ГОСТ 14846. Общий вид стенда для испытания двигателя приведен на рис. 2.14.

Перед испытаниями провели измерения коленчатого вала, шатунов и вкладышей с использованием микрометров, индикатора часового типа и нутрометра (ГОСТ 6507-80).

Измерения профиля вкладышей (прогиб) и отклонений от геометрической формы нижней головки шатуна проводили на специально созданном приспособлении (рис. 2.3, 2.4).

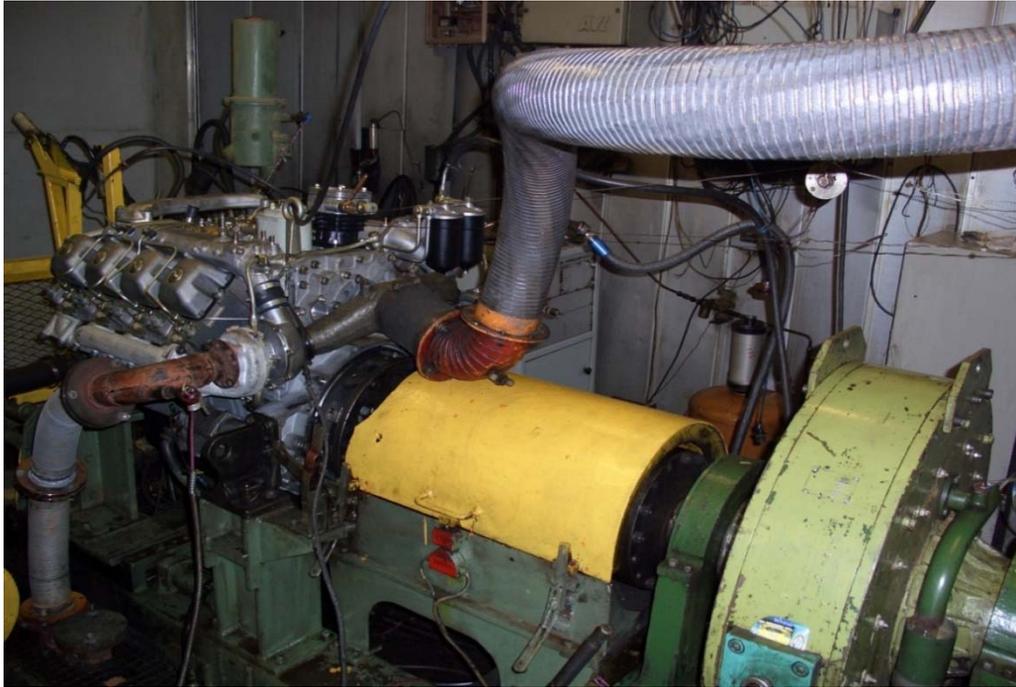


Рис. 2.14. Стенд для периодических испытаний двигателей КамАЗ

2.8. Методика эксплуатационных исследований

При эксплуатационных исследованиях проводили измерения размеров и формы рабочих поверхностей деталей (коленчатых валов, шатунов, постелей блоков, вала ротора и втулок турбокомпрессоров) и диагностических параметров двигателя.

Диаметр нижней и верхней головок шатуна измеряли нутромером (точность 0,01 мм).

Прогиб вкладыша измеряли индикатором часового типа МИГ-1 (с ценой деления 0,002 мм) на приспособлении, описанном выше (рис. 2.3, 2,4).

Методику измерения прогиба вкладыша (отклонение образующей поверхности от прямолинейности) использовали такую же, как и для определения корсетности нижней головки шатунов, крайнее положения стрелки индикатора являлось величиной прогиба вкладыша (рис. 2.4, а).

С целью определения эффективности предлагаемых методов поддержания работоспособности двигателей КамАЗ, были проведены сравнительные испытания двигателей с восстановленными шатунами, двигателей, прошедших капитальный ремонт, и двигателей, находящихся в эксплуатации. Количество исследуемых двигателей каждого типа по 5 единиц. Контроль исследуемых параметров проводился на двигателях с пробегом до 80 тыс. км, используя диагностические устройства, разработанные в СГТУ имени Гагарина Ю.А. и на ЗАО «Ремдизель» [7, 26, 192].

2.9. Выводы

1. Предложенная методология экспериментальных исследований позволяет проверить достоверность аналитических выводов и эффективность предложенных методов и средств по увеличению ресурса силовых агрегатов автомобилей.

2. Разработанные методы и измерительные устройства для определения отклонений размеров и формы рабочих поверхностей ресурсопределяющих деталей позволяют повысить качество дефектовки и сборки деталей.

3. Расчетно-экспериментальный метод оценки влияния режимов формирования электролитических железных покрытий на восстанавливаемые поверхности, на равномерность распределения покрытия и его физико-механические свойства за счет применения математической модели, влияния режимов электролиза позволяет оценить эффективность предлагаемого способа.

4. Применение стандартных и общепринятых методик стендовых, трибологических, дает возможность получения взаимосвязанных результатов и их сравнимость.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В основе методологии обоснования технологии восстановления ресурсоопределяющих элементов двигателя лежит причинно-следственная связь условий работы объекта, изменения поверхностных слоев сопряжений, определяющих эксплуатационный срок службы автомобиля, возникновения и развития процессов изнашивания деталей, их напряженно-деформированного состояния, определяющего вероятностный характер отказов и эксплуатационную долговечность автомобиля, технологических процессов, обеспечивающих восстановление ресурсоопределяющих деталей, силового агрегата и автомобиля в целом, определяющих структуру эксплуатационно-ремонтного цикла двигателя и нормативы обеспечения работоспособности автомобиля (рис. 3.1). Все это необходимо учитывать при обосновании технологии ремонта.

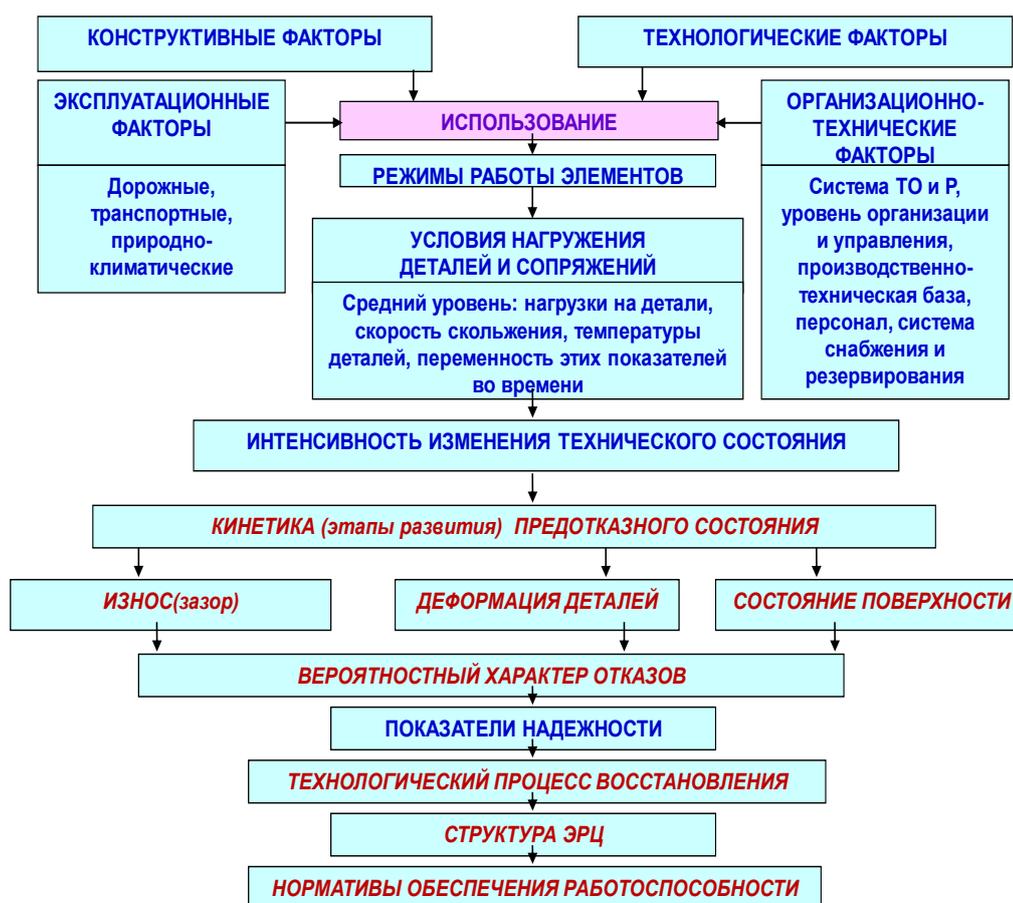


Рис. 3.1. Схема причинно-следственной связи факторов и нормативов технической эксплуатации автомобилей

3.1. Анализ условий развития процессов изнашивания основных элементов двигателя

3.1.1. Изменение технического состояния шатуна

Интенсивность изменения технического состояния ресурсопределяющих деталей в процессе эксплуатации определяется условиями их нагружения. От этого зависит интенсивность изнашивания усталостного разрушения и деформации этих элементов. Динамическая нагруженность деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ) обусловлена увеличением давления газов в надпоршневом пространстве и соударениями перемещающихся элементов кривошипно-шатунного механизма. Соударения в сопряжениях возникают при перекладке поршня, перемене направления действия сил (рис. 3.1) [8, 104, 137, 144, 276, 322]. Ударные явления проявляются как на шатунных, так и на коренных подшипниках коленчатого вала, в сопряжении шейка коленчатого вала – шатун, шейка коленчатого вала – постель блока, шатун – поршневой палец – поршень [137, 331].

Сила P , действующая на поршень, раскладывается на составляющие: боковую силу, действующую нормально к оси цилиндра:

$$N = P \operatorname{tg} \beta, \quad (3.1)$$

и силу, действующую вдоль оси шатуна (рис.3.2):

$$S = \frac{P}{\cos \beta}. \quad (3.2)$$

Как показано на рис. 3.2, сила, действующая вдоль оси шатуна, является составляющей суммарной силы:

$$S = P / \cos \beta, \text{ или } P = S \cdot \cos \beta. \quad (3.3)$$

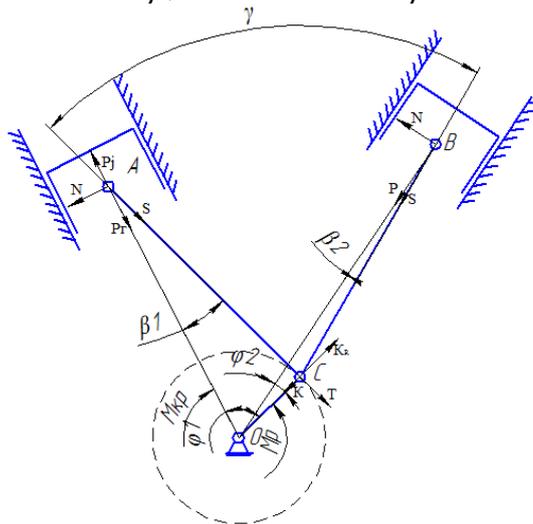


Рис. 3.2. Схема действия сил в КШМ двигателя КамАЗ-740:
 P_j – сила возвратно-поступательно движущихся масс; P_r – сила действия газов;
 P – суммарная сила; K_R – центробежная сила инерции вращающихся масс;
 N – нормальная сила, воспринимаемая стенками цилиндра; S – сила, действующая вдоль шатуна; K – сила, направленная по радиусу кривошипа;
 T – сила, направленная по касательной к радиусу кривошипа;
 $M_{кр}$ – крутящий момент; M_r – реактивный момент

Общая сила трения определяется из сил инерции, давления газов в надпоршневом пространстве, сил трения, возникающих в процессе работы:

$$P = P_j + P_r - P_{тр}. \quad (3.4)$$

Исходя из этого, выражение (3.4) можно записать как:

$$P_{тр} = (P_j + P_r) - S \cdot \cos\beta. \quad (3.5)$$

Нагрузка по оси шатуна передается почти полностью. Шатун вследствие действия dp/dt совершает продольные колебания, амплитуда которых зависит только от dp/dt . Частота этих колебаний 1445 Гц и не зависит от dp/dt [26].

В такте расширения возникают газодинамические колебания, величина которых зависит от максимальной скорости нарастания давления. Эти колебания вместе с ударной нагрузкой вызывают в механизме вынужденные колебания. Шатунно-поршневая группа из-за своей инерционности не способна следить за изменением давления газов в цилиндре дизеля при сгорании топлива, поэтому имеют место собственные колебания. Вследствие несжимаемости масла колебания передаются в виде гидродинамических колебаний в масляном слое шатунного подшипника. На некоторых режимах между трущимися поверхностями сопряжений происходит уменьшение толщины масляного слоя при этом величина ее может достигать $h_{\min} = 15 \div 16,3$ мкм [26].

Коэффициент динамичности k_d с уменьшением h_{\min} снижается с 1,179 до 1,155, что обусловлено повышением несущей способности масляного слоя между вкладышем и шейкой коленчатого вала ξ с 91,5 до 164,7 c^{-1} [224].

Втулка верхней головки шатуна изнашивается в плоскости оси шатуна, то есть в плоскости действия газовых и инерционных сил. Задиры, прижоги, проворачивание вкладышей на шатунных шейках коленчатого вала приводят к повреждению головки шатуна, изменяя ее размер и форму [26, 65, 74, 120, 122].

3.1.2. Изнашивание верхней и нижней головок шатуна в процессе эксплуатации

Верхняя головка шатуна

В верхней головке шатуна в процессе эксплуатации происходит изнашивание втулки и поршневого пальца. Данный тип сопряжения относится к динамически нагруженным, для которых, как обосновано в работах Ф.Н. Авдоськина [2, 6], справедлива экспоненциальная зависимость износа S от наработки l :

$$S = S_0 e^{bl}, \quad (3.6)$$

где S_0 – износ в конце периода приработки, приведенный к началу эксплуатации; b – изменение интенсивности изнашивания на единицу износа.

Характер действующих нагрузок на шатун обуславливает изменение формы рабочей поверхности втулки в верхней головке шатуна в виде овальности, которая в процессе эксплуатации возрастает.

Для обоснования зависимости овальности втулки верхней головки шатуна от наработки примем допущение: параметр b в зависимости (3.6) одинаков и для обеих плоскостей. Обработка экспериментальных данных по износу элементов двигателей [31, 65,123] показывает, что разница в величине параметра b не превышает 10-15%.

Считаем, что исходная овальность равна нулю, тогда овальность в процессе эксплуатации (разница износов по оси шатуна S_1 и в перпендикулярной плоскости S_2) с учетом уравнения (3.6) составит:

$$\varepsilon = S_1 - S_2 = S_{01}e^{bl} - S_{02}e^{bl} = (S_{01} - S_{02})e^{bl} = \varepsilon_0 e^{bl}, \quad (3.7)$$

где $\varepsilon_0 = S_{01} - S_{02}$ – овальность отверстия в конце приработки, приведенная к началу эксплуатации [26].

Условия работы шатуна и действующие с высокочастотными колебаниями нагрузки изменяют плотность посадки втулки в верхней головке шатуна, вследствие разрушения микронеровностей в сопряжении (рис. 3.3), что приводит к фреттинг-изнашиванию и к проворачиванию втулки [26].



Рис.3.3. Взаимодействие микронеровностей шатуна и втулки (а) и схема условных микронеровностей (б)

По мере снижения высоты микровыступов вследствие изнашивания вероятность разрушения их снижается. Следовательно, с повышением износа интенсивность разрушения микровыступов (изнашивание) снижается. Форму зависимости можно принять линейной с учетом формы микровыступов (конус, пирамида):

$$\alpha = \alpha_0 - bS, \quad (3.8)$$

где α_0 – интенсивность изнашивания в конце периода приработки, приведенная к началу эксплуатации; b – изменение интенсивности изнашивания на единицу износа; S – износ (рис. 3.4) [26].

Поскольку интенсивность изнашивания $\alpha = dS / dl$, то, интегрируя дифференциальное уравнение (3.8), получим зависимость α от l и S от l :

$$\frac{dS}{dl} = \alpha_0 - bS; \quad l = \int \frac{dS}{\alpha_0 - bS} = -\frac{1}{b} \ln(\alpha_0 - S) + C_u, \quad (3.9)$$

где C_u – постоянная интегрирования при $S = 0$ и $l = 0$.

Преобразуя выражение (3.9), запишем $e^{-b_n(l-C_u)} = \alpha_{n0} - b_n S_n$ или при начальных условиях $e^{b_n C_u} = \alpha_{n0}$.

После преобразований получим:

$$\alpha_{n0} e^{-b_n l} = \alpha_{n0} - b_n S = \alpha_n, \quad \text{или} \quad \alpha_n = \alpha_{n0} e^{-b_n l}. \quad (3.10)$$

То есть, интенсивность изнашивания при наработке уменьшается.

Решение выражения (3.10) относительно износа S :

$$S_n = \frac{\alpha_{n0}}{b_n} (1 - e^{-b_n l}), \quad (3.11)$$

где $\frac{\alpha_{n0}}{b_n} = S_n$ – износ в конце приработки, приведенный к началу эксплуатации (рис. 3.4) [26].

По аналогичной зависимости в процессе эксплуатации увеличивается и овальность верхней головки шатуна.

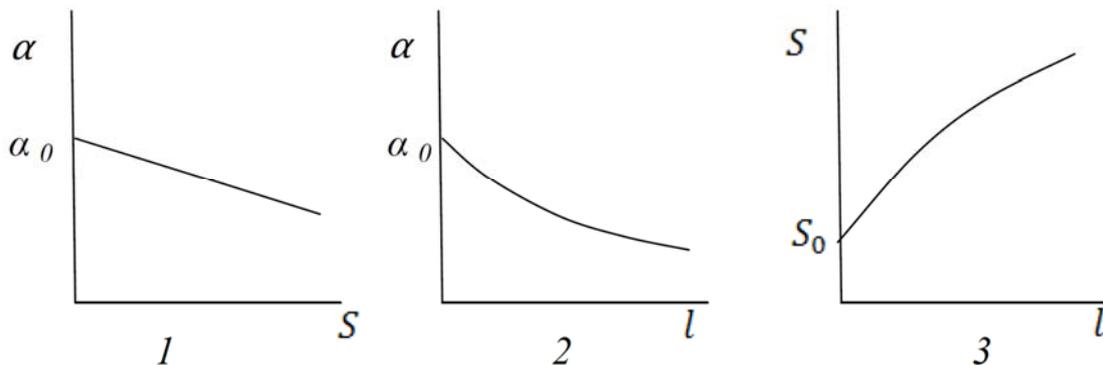


Рис.3.4. Характер зависимости интенсивности изнашивания α от износа S (1) и пробега l (2), износа S от пробега l (3)

Таким образом, для поддержания работоспособности силового агрегата необходимо определить технологии восстановления ресурсопределяющих деталей, в частности верхней головки шатунов, с учетом процессов, происходящих в сопряжениях [25, 26].

Нижняя головка шатуна

Характер работы сопряжения нижней головки шатуна, которое тоже является неподвижным, отличается от характера работы сопряжений верхней головки.

В результате потери геометрической формы вкладышем (проявление прогиба) (рис. 3.5) возрастает вероятность схватывания вкладыша с шейкой коленчатого вала и его проворачивание [26, 128, 165, 183].

Т.е. данный дефект (поворачивание вкладышей) является результатом деформирования вкладышей. В процессе работы вкладыш с измененной геометрической формой (прогибом по образующей) краями будет изнашивать нижнюю головку шатуна (рис. 3.5), что в итоге изменит ее геометрическую форму и изменит условия работы неподвижного сопряжения вкладыш – нижняя головка шатуна.

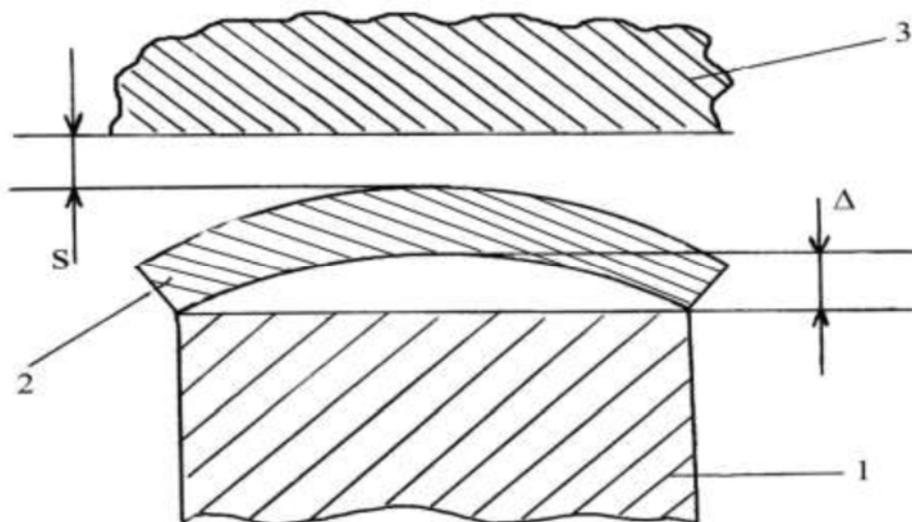


Рис. 3.5. Характер поперечной деформации вкладыша:
1 – шатун; 2 – вкладыш; 3 – шейка вала; Δ – прогиб вкладыша;
 S – зазор в подшипнике

Это обуславливает рост корсетности нижней головки шатуна, величина которой прямо пропорциональна величине деформации вкладыша, вследствие повышения его упругости (рис. 3.6) [26]:

$$F = c\Delta, \quad (3.12)$$

где F – сила деформации (по краям вкладыша $F/2$); Δ – прогиб вкладыша; c – характеристика (жесткость) пружины (вкладыша).

В работах [8, 123, 124, 128] показано, что зависимость Δ (прогиба вкладыша) от наработки силового агрегата l экспоненциальная:

$$\Delta = \Delta_0 e^{bl}, \quad (3.13)$$

где Δ_0 – относительный прогиб в конце приработки, приведенный к началу эксплуатации; b – параметр интенсификации. С учетом этого и зависимости

(3.12) корсетность нижней головки шатуна K (рис. 3.6) с увеличением наработки тоже увеличивается экспоненциально:

$$K = K_0 e^{bl}, \quad (3.14)$$

где K_0 – корсетность в конце приработки; b – параметр интенсификации [26].

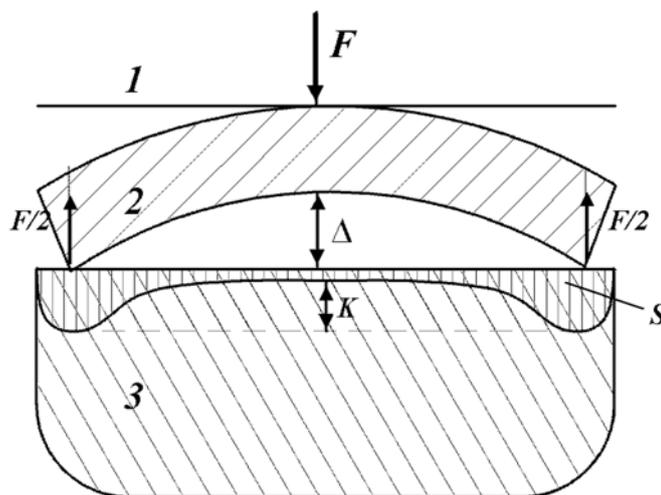


Рис. 3.6. Схема деформации вкладыша с прогибом Δ , силой F :
1 – шейка; 2 – вкладыш; 3 – шатун

Анализ исследований ремонтного фонда шатунов показывает, что при наработке двигателем 100 тыс. км и более у шатунов наблюдается изменение размеров и формы нижней головки обусловленные деформированием вкладыша (рис. 3.6). Эти отклонения находятся в верхнем поле допуска на размер или выходят за него. Следовательно, при восстановлении работоспособности двигателя путем замены вкладышей, ресурс силового агрегата будет несколько ниже, т.к. без восстановления формы нижних головок шатунов условия контакта вкладышей с ними ухудшатся, что может привести к перегреву сопряжения вследствие снижения теплообмена между ними.

В данном неподвижном сопряжении момент трения составит [26, 123]:

$$M_{\kappa} = \frac{\pi}{2} D^2 b (1 - H) g_{\Sigma} f, \quad (3.15)$$

где D – диаметр постели шатуна; b – ширина вкладыша; H – часть площади, на которой вкладыш не контактирует с постелью шатуна; f – коэффициент трения стали по стали.

Отсюда видно, при наработке корсетность увеличивается, момент трения M_{κ} , в сопряжении вкладыш – головка шатуна снижается. Поэтому при проведении текущего ремонта двигателя необходимо дефектовать ресурсопределяющие элементы, в частности шатуны и восстанавливать их при необходимости [26, 112, 115, 25, 117, 118, 126].

3.1.3. Анализ напряженно-деформированного состояния шатуна в процессе эксплуатации

Действующие на шатун циклические нагрузки (рис. 3.7) имеют динамический характер воздействия. Возникающие низкочастотные колебания в механизме соответствуют скоростному режиму двигателя, а высокочастотные колебания — это собственные колебания, возникающие от инерционных нагрузок и увеличивающиеся при увеличении зазоров в сопряжении. При исследовании напряженно-деформированного состояния элементов [310, 311] рассматривали работу деталей с напряжениями в пределах упругости их материала. В процессе наработки амплитуда динамических нагрузок в сопряжениях (подшипниках) возрастает с повышением зазоров.

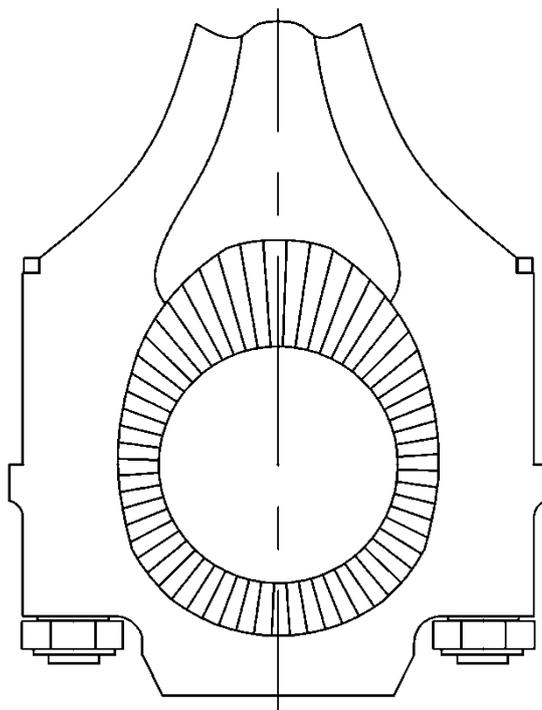


Рис. 3.7. Эпюра нагрузок в нижней головке шатуна

Повышающиеся в 2,5-3 раза зазоры, вследствие износа сопряжений, вызывают рост динамических нагрузок [231, 314]. Из вышеописанного определено, что зазоры в сопряжениях увеличиваются по экспоненте [25, 26] аналогично возрастают и динамические нагрузки.

Вследствие увеличения динамических нагрузок и повышения температуры в трущейся паре в материале детали проявляются такие свойства, как ползучесть. Данное свойство связано с возрастанием пластических деформаций при неизменных или увеличивающихся нагрузках.

Вероятность возникновения такого свойства, приводящего к деформации рабочих поверхностей, потери их соосности зависит также от наработки

силового агрегата (возникновение остаточных деформаций) и условий его эксплуатации (перегрев двигателя). Вероятность показана на рис.38 (заштрихованная поверхность F). Это объясняет те геометрические изменения (овальность) происходящие в нижней головке шатуна в процессе работы, которые обусловлены возникновением деформаций, в том числе и остаточных, вследствие действия динамических нагрузок. Направление действия нагрузок определяет форму овальности ε с большей осью овала по оси шатуна, в соответствии с эпюрой нагрузок (рис. 3.7).

Форма зависимости овальности ε от наработки l аналогична (3.6):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon^{bl}, \quad (3.16)$$

где ε_0 – овальность в конце приработки, приведенная к началу эксплуатации; b – изменение интенсивности овализации на единицу овальности [26].

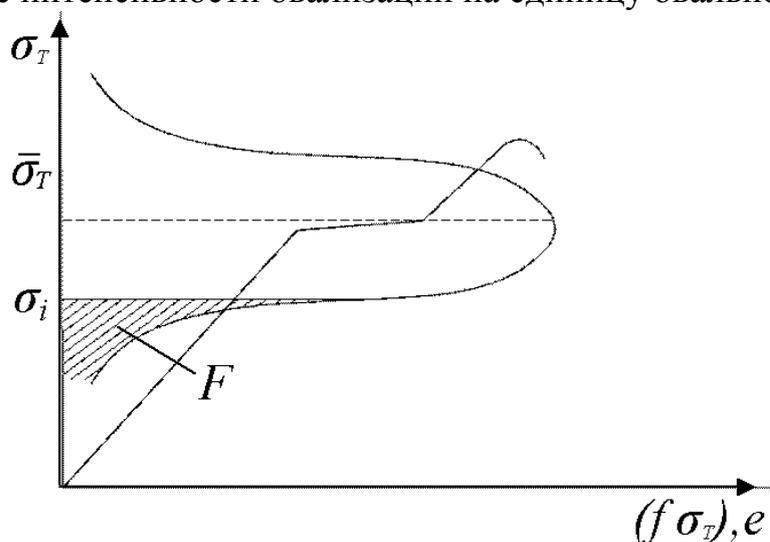


Рис. 3.8. Распределение предела текучести и диаграмма напряжение – деформация

Изменение размеров и формы нижней головки шатуна приводит к потере формы вкладыша, как тонкостенного элемента, потере плотности его посадки и провороту. Проворачивание вкладышей – результат его закономерного деформирования по образующей в виде прогиба.

При анализе деформаций вкладышей и возможных причин их проворачивания исходили из упругопластических свойств материала вкладышей и их напряженно – деформированного состояния при эксплуатации [26, 123].

Исследования вкладышей вышедших из строя двигателей (проведенные в лаборатории кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» СГТУ имени Гагарина Ю.А. и ОАО «Саратовский автоцентр КАМАЗ»), подтвердили исследования [112, 123], что изменения наружной и внутренней поверхностей, формы вкладышей предшествуют процессу их проворачивания. Эти изменения (рис. 3.9, 3.10) проявляются в виде прогиба

вкладышей по образующей (Δ), уменьшения в свободном состоянии их размера (δ), появления натиров, следов температурного воздействия, прижогов, приводящие к ухудшению условий посадки вкладыша (натяга) [26].

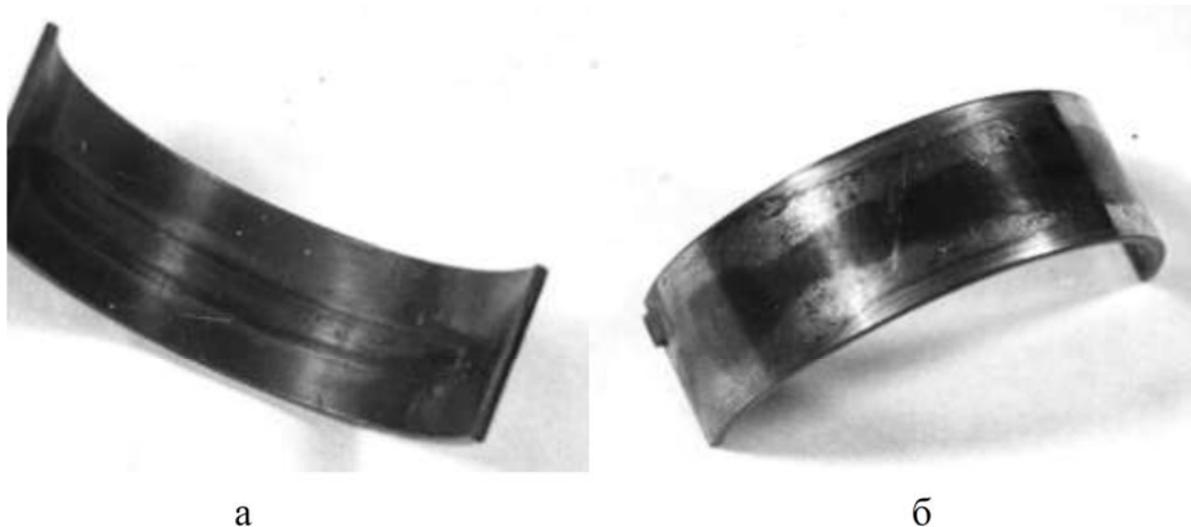


Рис. 3.9. Вид вкладыша после эксплуатации со стороны рабочей поверхности (а) и постели (б)

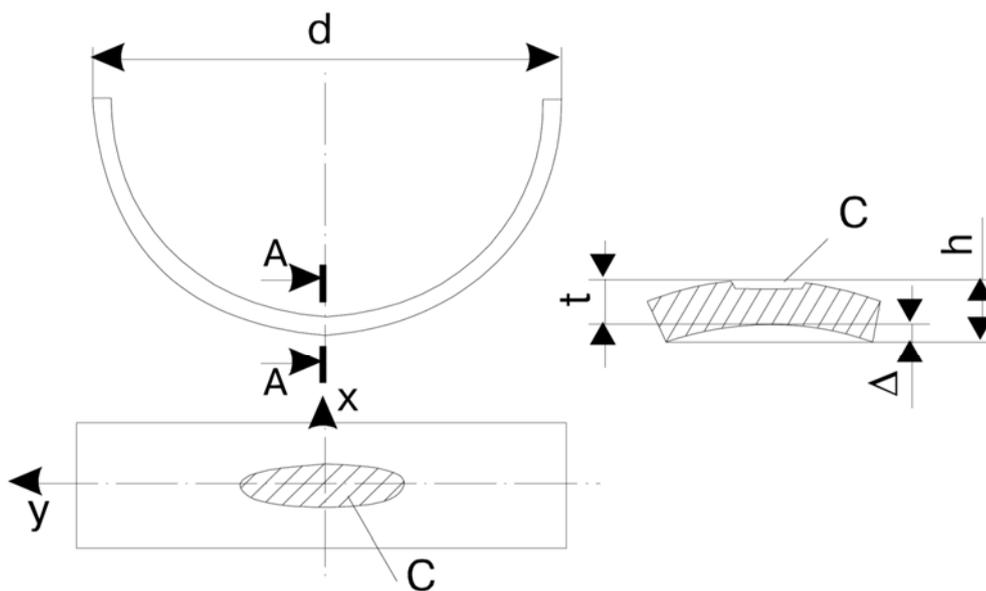


Рис. 3.10. Схема деформации и расположения зон натиров и прижогов шатунных вкладышей

Одной из причин схватывания вкладышей с шейками коленчатого вала и их проворачивания принято считать поступление с маслом в подшипники абразивных частиц [256]. Абразивные частицы, попадая между трущимися поверхностями, образуют кольцевые риски, как на шейке вала, так и на антифрикционном слое вкладыша, что приводит к увеличению зазора в

сопряжении, повышению температуры, задиру и проворачиванию вкладышей. Для снижения воздействий данного фактора на двигателе КамАЗ улучшили очистку масла, используя бумажные фильтрующие элементы, совершенствовали центробежную очистку масла, но проворачивание вкладышей не было исключено [189].

Проведенные исследования эксплуатационных разрушений вкладышей на силовых агрегатах КамАЗ [26, 123] показывают, что проворачивание вкладышей происходит вследствие их деформирования.

Коренные вкладыши выходят из строя в 5 раз реже, чем шатунные [26, 112, 123, 128], причинами их проворачивания является снижение давления в системе смазки (неисправности масляного насоса, задиры и износ шеек и вкладышей), схватывание сопряжения из-за граничных условий смазки и прогиба вкладышей [26, 112, 128, 189, 191, 314].

Из вышесказанного следует, что причиной задиров и проворачивания вкладышей коленчатых валов является нарушение условий жидкостной смазки в подшипнике.

Вследствие сложной геометрической формы и условий нагружения элементов шатуна аналитические решения имеют погрешность и требуют коррекции с помощью эмпирических коэффициентов. Для более точного исследования напряженно-деформированного состояния шатуна используем метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий решать задачи теории упругости применительно к деталям сложной формы [310].

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) шатуна, с использованием метода конечных элементов (МКЭ), и твердотельное моделирование, с автоматическим построением конечно-элементной сетки (трехмерные конечные элементы), рис. 3.11, подтверждают результаты исследования рассеивания размеров и форм рабочих поверхностей деталей вследствие действия нагрузок в процессе эксплуатации [310]. Треугольные трехузловые конечные элементы позволяют достаточно точно аппроксимировать криволинейные границы подобластей шатуна.

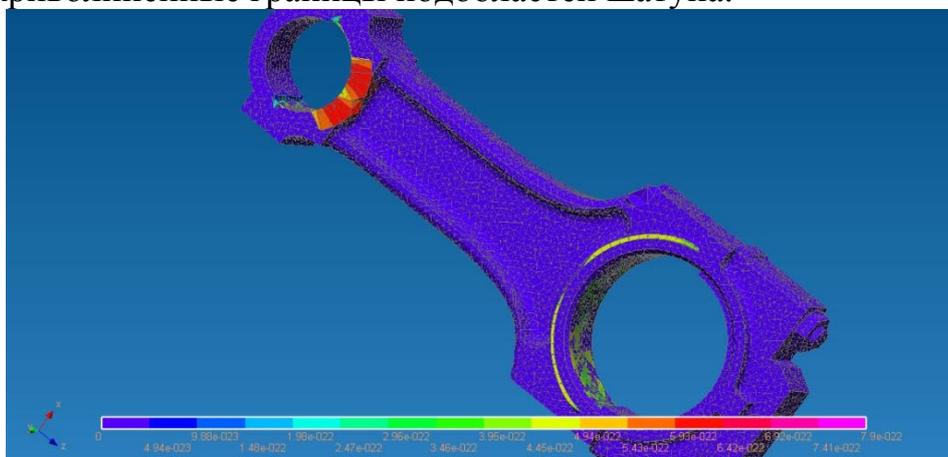


Рис. 3.11. Распределение напряжений в нижней и верхней головках шатуна σ_z , (МПа) при действии сил давления газов

Вычисление осуществляем с помощью программы APM Win Machine 9.7, которая позволяет определять усилия, действующие в подшипниках поршневой и кривошипной головок, инерционные усилия, действующие на каждый конечный элемент.

При расчете верхней головки шатуна сила давления газов прикладывалась к поршню, при расчете нижней головки шатуна сила давления прикладывалась к шатунной шейке коленчатого вала, а сила инерции – в виде объемной силы. Перераспределение нагрузок при взаимодействии шатуна с элементами цилиндропоршневой и кривошипно-шатунной группы осуществлялось введением контактных элементов.

С учетом этих процессов при ремонте шатуна целесообразно контролировать овальность нижней головки и восстанавливать ее при достижении предельной величины [16, 37].

3.2. Изменение технического состояния коленчатого вала

Сила S (рис. 3.2), действующая на шатунные шейки коленчатого вала, который представляет собой пространственную многоопорную балку переменного сечения (рис. 3.12), может быть разложена на две составляющие: радиальную, направленную вдоль оси кривошипа, и тангенциальную силу, действующую перпендикулярно кривошипу (рис. 3.13) [310, 322]:

$$Z = P_1 \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos(\beta)}; \quad (3.17)$$

$$T = P_1 \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\beta)}. \quad (3.18)$$

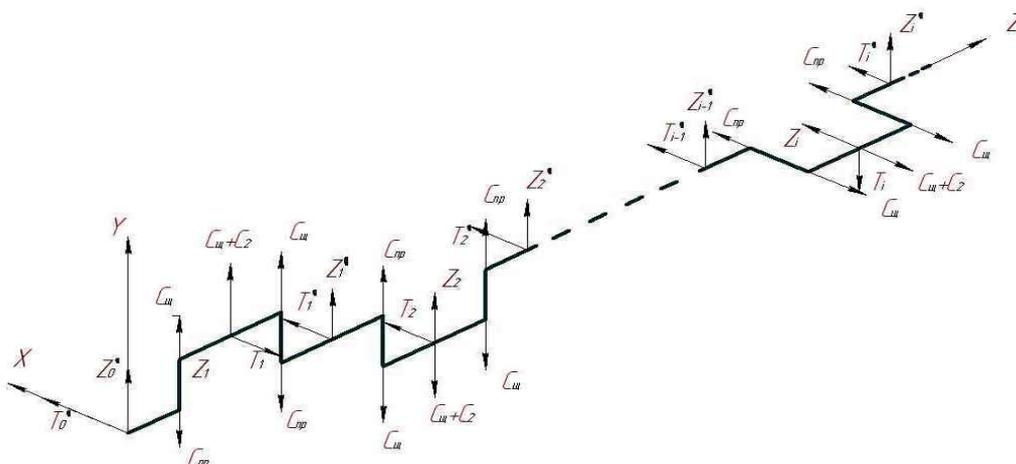


Рис. 3.12. Расчетная модель коленчатого вала V-образного двигателя

По результатам теплового и динамического расчета построены графики нагрузок на коренную опору блока цилиндров (рис.3.13).

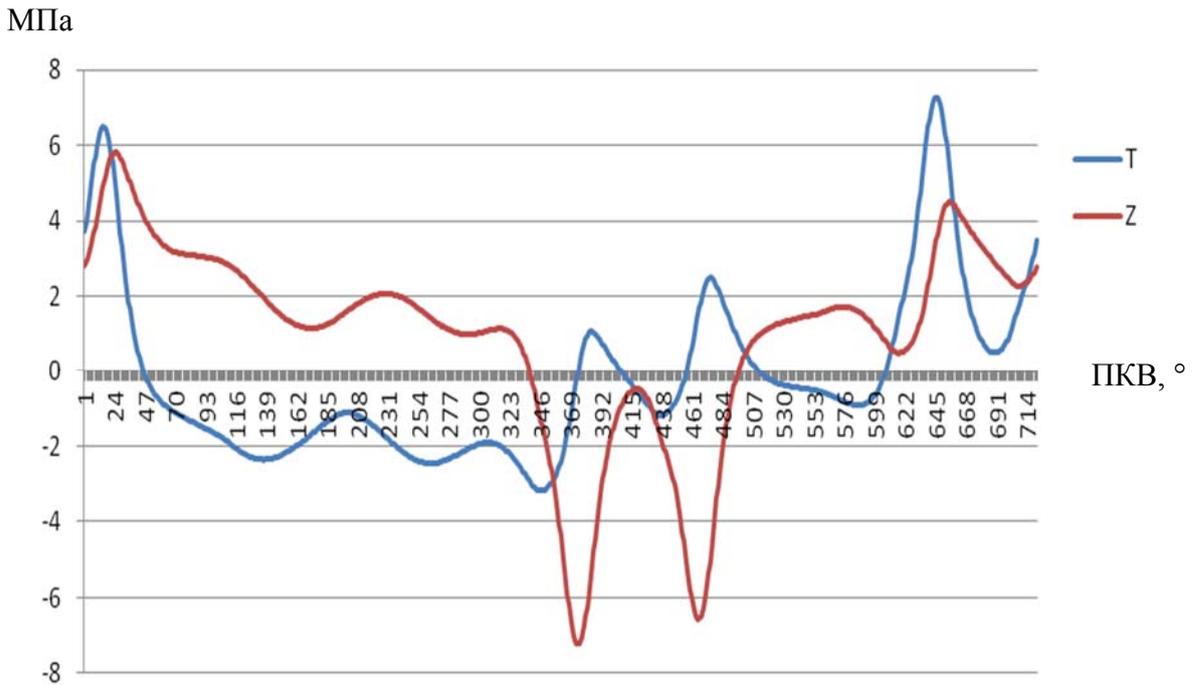


Рис. 3.13. Нагрузки на коренную опору блока цилиндров по углу поворота коленчатого вала:
 T – тангенциальное усилие, Z – нормальное усилие

Система нагружающих коленчатый вал усилий в течение рабочего цикла двигателя непрерывно меняется по углу поворота вала (рис. 3.12).

Нагрузка T, от действия газовых сил на кривошип, создает крутящий момент $M_{кр}$ на валу:

$$M_{кр} = TR. \quad (3.19)$$

Также на шатунную шейку действуют изгибающие моменты в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях (рис. 3.14) [310].

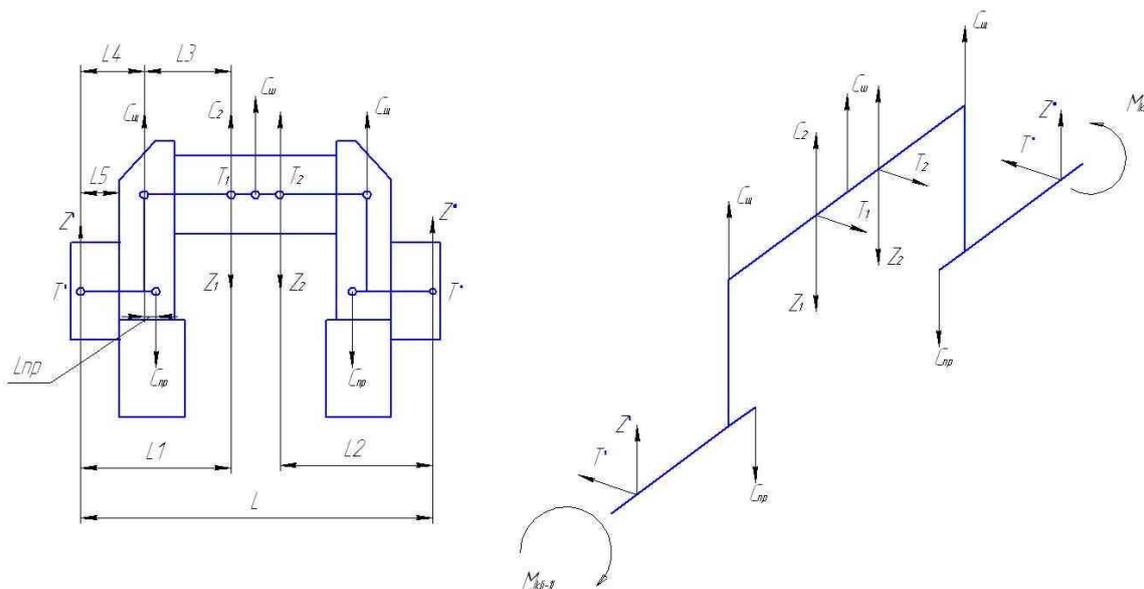


Рис. 3.14. Расчетная схема колена вала V-образного двигателя:
 $C_{ш}$, $C_{щ}$, $C_{пр}$ и C_2 – центробежные силы шатунной шейки, щеки, противовеса и массы шатуна, отнесенной к шатунной шейке

Напряжения кручения $\tau_{ш}$ и изгиба $\sigma_{шш}$ определяются в точке выхода на поверхность маслоподводящего отверстия. Крутящий момент, действующий на шатунную шейку, определяется из выражения:

$$M_{кш} = M_{к(i-1)} + T^1 R. \quad (3.20)$$

Максимальные, минимальные и средние значения касательных напряжений, а также амплитуда определяются по формуле

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{ш \max} = \frac{M_{кш \max}}{W} \\ \tau_{ш \min} = \frac{M_{кш \min}}{W} \\ \tau_{ш \text{ср}} = \frac{\tau_{ш \max} + \tau_{ш \min}}{2} \\ \tau_{ш \text{амп}} = \frac{\tau_{ш \max} - \tau_{ш \min}}{2} \end{array} \right\}, \quad (3.21)$$

где $W_{кш}$ – момент сопротивления кручению шатунной шейки в расчетном месте (месте маслоподводящего отверстия или по галтели).

Изгибающий момент, действующий в расчетном сечении в плоскости колена (рис. 3.14):

$$M_z = Z^1 (L_4 + L_3) + C_{ш} L_3 - C_{пр} (L_3 - L_{пр}). \quad (3.22)$$

Изгибающий момент, действующий в расчетном сечении в плоскости, перпендикулярной плоскости колена:

$$M_{шшГ} = T^1 L_1. \quad (3.23)$$

Напряжения изгиба в плоскости маслоподводящего отверстия:

$$\sigma_{шш} = \frac{M_{шш}}{W_{шш}}, \quad (3.24)$$

где $W_{шш}$ – момент сопротивления изгибу шатунной шейки (в месте маслоподводящего отверстия или по галтели).

Максимальные и минимальные напряжения, амплитуда и среднее значение нормальных напряжений цикла:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{шш \max} = \frac{M_{шш \max}}{W_{шш}} \\ \sigma_{шш \min} = \frac{M_{шш \min}}{W_{шш}} \\ \sigma_{шш \text{ср}} = \frac{\sigma_{шш \max} + \sigma_{шш \min}}{2} \\ \sigma_{шш \text{амп}} = \frac{\sigma_{шш \max} - \sigma_{шш \min}}{2} \end{array} \right\}. \quad (3.25)$$

Наиболее опасными являются галтели коленчатого вала – места перехода щек в коренную шейку вала. Щеки нагружаются переменными и изгибающими моментами в двух плоскостях, а также сжимающими и растягивающими силами, что приводит к образованию усталостных трещин и поломке вала (рис. 3.15) [286, 310].



Рис. 3.15. Усталостное разрушение коленчатого вала

Также в галтелях действуют напряжения от кручения соответствующей щеки. Анализ поломок коленчатых валов двигателя КамАЗ показывает, что разрушения в основном носят усталостный характер, преимущественно из-за действия изгибающих моментов, нежели от действия крутящих моментов. Разрушение чаще начинается в галтелях сопряжения щек с шейками или у краев отверстий, масляного канала для смазывания шеек, т.е. в зонах наибольшей концентрации напряжений (рис. 3.16) [73, 152, 223, 233].

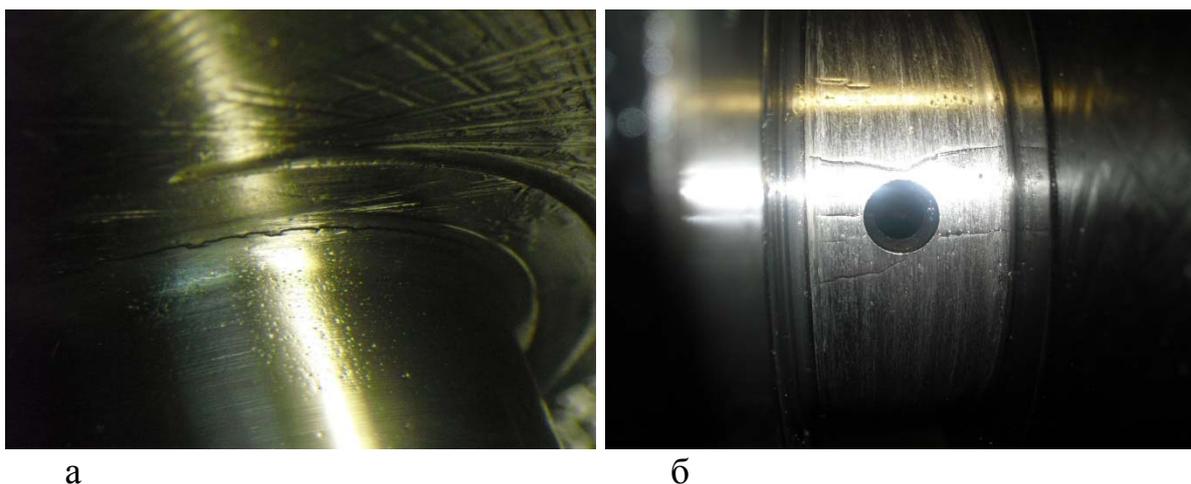


Рис. 3.16. Усталостные трещины в зонах концентрации напряжений: в галтелях вала (а), в зоне маслоподводящего отверстия (б)

Разрушение коленчатого вала по щеке происходит в зоне перекрытия шатунных и коренных шеек, для коленчатых валов двигателя КамАЗ перекрытие составляет 27,5 мм при номинальном размере шеек [286].

Изгибающий момент, действующий в плоскости колена:

$$M_{\text{ищ}} = Z^1 L_4 + C_{\text{пр}} L_{\text{пр}}. \quad (3.26)$$

Номинальные напряжения изгиба в этой плоскости:

$$\sigma_{\text{ищ}} = \pm \frac{M_{\text{ищ}}}{W_{\text{ищ}}}, \quad (3.27)$$

где $W_{\text{ищ}} = \frac{b^2 h}{6}$ – момент сопротивления щеки изгибу в плоскости колена;

знак «плюс» относится к точке 2, знак «минус» – к точке 1 (рис. 3.14).

Растягивающая (сжимающая) сила, действующая на щеку:

$$P_{\text{щ}} = -Z + C_{\text{пр}}. \quad (3.28)$$

Напряжения растяжения (сжатия) в щеке:

$$\sigma_{\text{рщ}} = P_{\text{щ}} / F_{\text{щ}}. \quad (3.29)$$

где $F_{\text{щ}} = bh$ – площадь сечения щеки.

Общие нормальные номинальные напряжения определяются как сумма напряжений от изгиба и от растяжения (сжатия):

$$\sigma_{\text{щ}} = \sigma_{\text{ищ}} + \sigma_{\text{рщ}}. \quad (3.30)$$

Для более полного и точного анализа напряженно-деформированного состояния шеек коленчатого вала воспользуемся численными методами. Численные методы, в отличие от аналитических, позволяют получить решение задачи не в виде окончательных расчетных зависимостей, а в виде массивов чисел, характеризующих поля напряжений или других исследуемых параметров узла или детали. Наиболее универсальным из численных методов является метод конечных элементов МКЭ [321]. Данный метод позволяет достаточно точно описать криволинейные границы деталей, различные условия закрепления и нагружения исследуемых элементов. Анализ напряженно-деформированного состояния в элементах двигателя, находящихся в условиях высоких механических нагрузок при умеренных температурах проводили методами теории пластичности, устанавливающей связи между пластическим деформированием и напряжением [64, 310].

Деформация θ пропорциональна среднему нормальному напряжению:

$$\sigma_0 = K \theta, \quad (3.31)$$

где $K = E/3(1-2\mu)$.

Как следует из (3.31), связь деформации θ и напряжения σ_0 такая же, как в теории упругости [312]. Исходя из этого, в результате пластического деформирования изменения объема тела не происходит, а меняется форма.

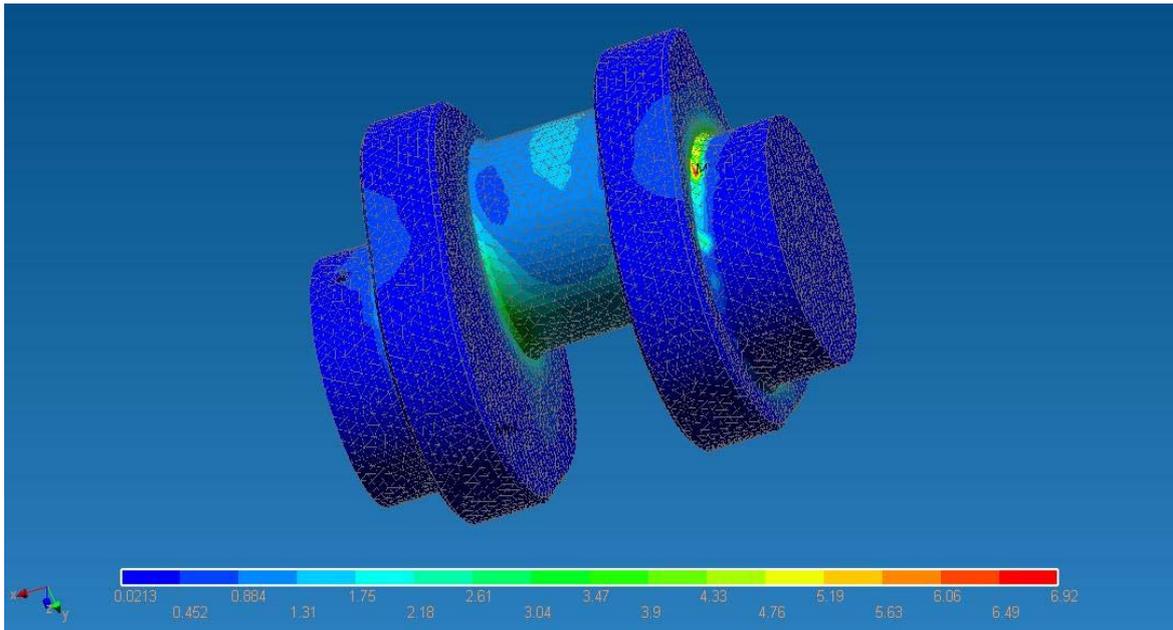


Рис. 3.17. Распределение напряжений σ_z (МПа) в коленчатом вале двигателя КамАЗ-740

Наибольшие напряжения находятся в зоне галтелей шатунной и коренной шеек в результате действия изгибающих моментов. Увеличение НДС в местах концентрации напряжений (галтели и области вблизи маслоподводящих отверстий) с повышением динамических нагрузок, в свою очередь, приводит к образованию усталостных микротрещин (рис. 3.16).

Техническое состояние коренных подшипников характеризуется: износом и овальностью коренных шеек коленчатого вала, размерами и формой вкладышей, коренных опор блока цилиндров и их соосностью, а также зазорами между сопряженными деталями [144, 185, 199, 233].

Основное воздействие на коренную шейку оказывают крутящие моменты. Максимальное значение силы давления газов, направленное вдоль оси цилиндра, достигает $p_z=8,4$ МПа (рис. 3.18).

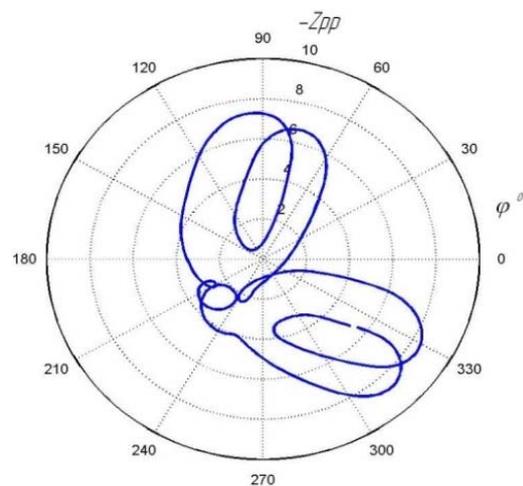


Рис. 3.18. Векторная диаграмма сил, действующих на коренную шейку

Максимальные и минимальные номинальные напряжения, амплитуда и среднее значение касательных напряжений цикла определяются из выражений

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{k \max} = \frac{M_{kk \max}}{W_{kk}} \\ \tau_{k \min} = \frac{M_{kk \min}}{W_{kk}} \\ \tau_{xa} = \frac{\tau_{k \max} - \tau_{k \min}}{2} \\ \tau_{km} = \frac{\tau_{k \max} + \tau_{k \min}}{2} \end{array} \right. , \quad (3.32)$$

где $W_{kk} = \pi \frac{d_1^4 - d_{1BH}^4}{16d_1}$ – момент сопротивления кручению коренной шейки, а

именно $M_{kk \max}$ $M_{kk \min}$, максимальный и минимальный крутящие моменты в коренных шейках, определяют по выражению $M_{ki} = M_{k(i-1)} + TR$.

Опорные реакции левой и правой опор колена вала (рис. 3.11) определяются из выражений:

опорные реакции левой опоры

$$\left. \begin{array}{l} Z' = (Z_1 - C_2) \frac{L - L_1}{L} + (Z_2 - C_2) \frac{L_2}{L} - 0,5C_{ш} - C_2 - C_{ш} + C_{пр}; \\ T' = T_1 \frac{L - L_1}{L} + T_2 \frac{L_2}{L}; \end{array} \right\} (3.33)$$

опорные реакции правой опоры

$$\left. \begin{array}{l} Z'' = (Z_2 - C_2) \frac{L - L_2}{L} + (Z_1 - C_2) \frac{L_1}{L} - 0,5C_{ш} - C_2 - C_{ш} + C_{пр}; \\ T'' = T_2 \frac{L - L_2}{L} + T_1 \frac{L_1}{L}. \end{array} \right\} (3.34)$$

Исследования надежности коленчатых валов показывают [117, 98, 262, 303, 304], что основной причиной их выхода из строя являются задиры на шейках коленчатых валов (40% двигателей). Причиной низкой надежности считаются неудовлетворительные антизадирные свойства при недостаточном пульсирующем подводе масла в подшипники [96, 97, 102, 119, 114, 119, 181, 184], нарушении в них условий гидродинамической смазки. На основании результатов исследований установлена связь между задирами, схватыванием шеек коленчатого вала с вкладышем и процессом зарождения трещин.

В соответствии с исследованиями проф. А.С. Денисова [120, 124, 126] зависимость давления масла в двигателе от пробега автомобиля, уменьшающаяся экспоненциальная:

$$p = p_0 e^{-b_p l}, \quad (3.35)$$

где p_0 – давление в конце приработки, приведенное к началу эксплуатации; b_p – параметр интенсификации; l – пробег = 0.

Нарушение условий гидродинамической смазки повышает вероятность изменения условий трения в сопряжениях ресурсопределяющих деталей и возникновения условий недостаточной жидкостной смазки (рис. 3.19) с коэффициентом трения, достигающим 0,05-0,08 [231, 232].

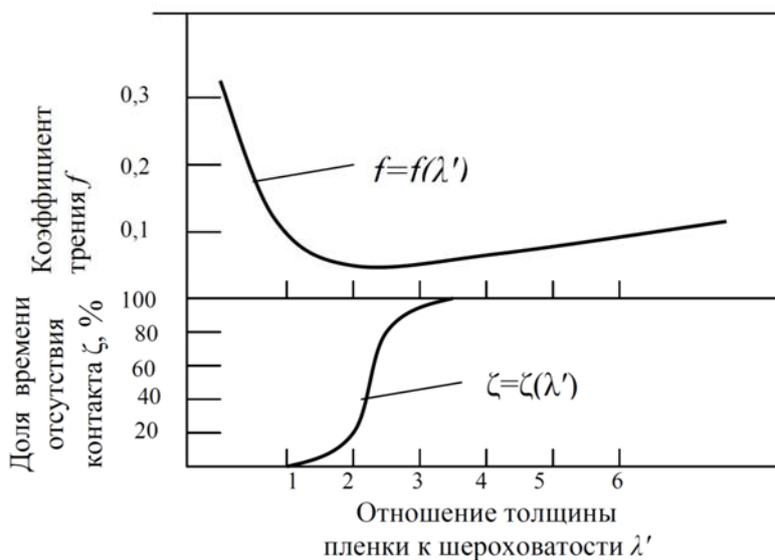


Рис. 3.19. Кривые Штрибека и доли времени отсутствия контакта (схема) [11, 190]

Подшипники, тяжело нагруженные и работающие при высокой частоте вращения, нуждаются в постоянном подводе масла под давлением, для обеспечения гидродинамической смазки. При нарушении этого (нестабильность подачи, уменьшение давления масла) образуются условия полужидкостной смазки, приводящие к уменьшению толщины масляной пленки и повышению вероятности соприкосновения микронеровностей шейки вала и вкладыша [120, 303], тепловыделение в подшипнике увеличивается, вследствие чего полужидкостное трение сопряжено с опасностью перегрева и выхода подшипника из строя (рис. 3.20).

Процесс движения вала в подшипниках скольжения обусловлен изменяющимися условиями работы (трения) и перемещениями вала в подшипнике по полукругу Гюмбеля (рис. 3.21) [16]. В начальный период вращения и условиях граничной смазки вал перемещается в сторону, противоположную вращению, на угол φ , в таких условиях происходит касание микронеровностей пары трения и их истирание (рис. 3.21, а).

С увеличением частоты вращения вал проталкивает под себя масло и «всплывает», образуя под собой масляный клин (гидродинамическая смазка).

Описанная траектория движения вала представлена на рис. 3.21, в. При $l/d=\infty$ траектория представляет собой правильную полуокружность (полуокруг Гюмбеля) [16].



Рис. 3.20. Задиры шейки коленчатого вала

При изменении условий работы в подшипнике и перехода вала его центру по кругу Гюмбеля нагрузка в этот момент увеличивается, и положение вала становится не устойчивым, он начинает прецессировать, касаясь о стенки подшипника. Для возвращения условий гидродинамической смазки необходимы условия для перемещения вала обратно по кругу Гюмбеля.

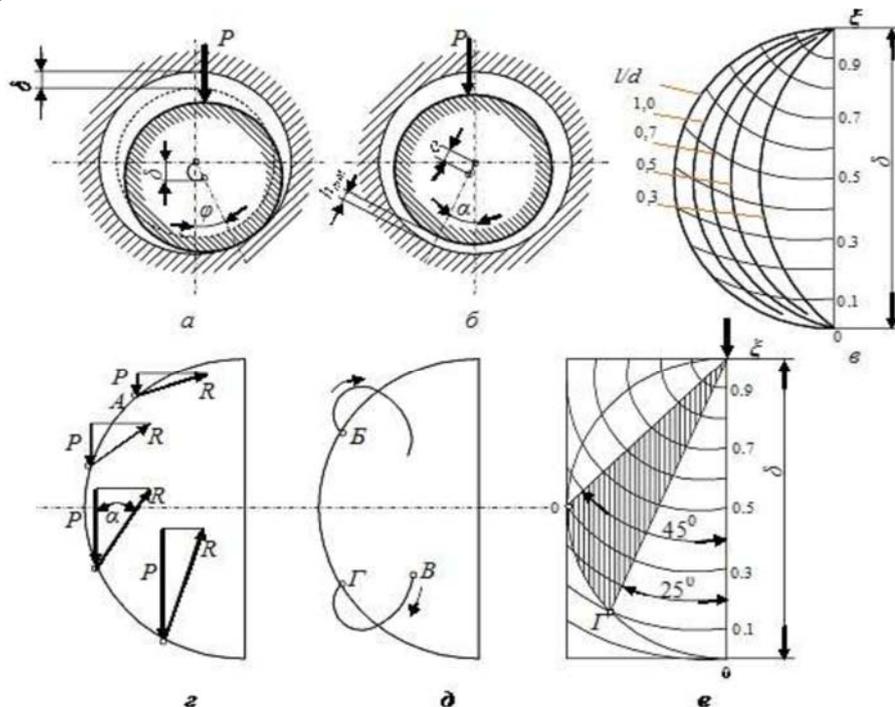


Рис.3.21. Положение вала в подшипнике и схема образования циклических вихревых движений вала

Таким образом, изменения в работе подшипника скольжения вызывают смещение вала, движение вала становится циклическим, что приводит к касанию микронеровностей сопряжения, повышению трения и тепловыделению в подшипнике [16].

При повышении относительной толщины масляного слоя ξ вал смещается под действием внешних нагрузок с равновесного положения (точка Б на рис. 3.21, д), совершает движение по спирали возрастающего радиуса, пока не приблизится к поверхности подшипника и не оттолкнется от неё под действием гидродинамических сил, возвращаясь в исходное положение, после чего цикл возобновляется.

При небольших значениях толщины масляного слоя ξ вал перемещается по спирали (точка В), циклическое движение уменьшается, возобновляются условия гидродинамической смазки. Разделом между стабильным и нестабильным условием жидкостной смазки является место соприкосновения полукруга Гюмбеля с направлением приложения нагрузки, точка О (рис. 3.21, е). В данном месте оси вала и подшипника находятся под углом 45° к действию силы, а $\xi = 1 - \varepsilon = 0,3$.

При относительной толщине масляного слоя $\xi < 0,3$ коэффициент стабильности его увеличивается. При $\xi < 0,1$ могут возникнуть условия опять перехода подшипника в область граничной смазки. Т.е условия, при которых подшипник устойчиво работает при жидкостном трении, находится между 45° и 25° рис. 3.21 (заштрихованная часть) [16].

Вследствие того, что работоспособность подшипника во многом обусловлена внешними (эксплуатационными) факторами, то связь коэффициента трения с величиной зазора в подшипнике носит вероятностный характер.

Для описания аналитической зависимости интенсивности изнашивания от зазора в сопряжении подшипника скольжения примем линейный характер зависимости между интенсивностью изнашивания α и коэффициентом трения f в виде:

$$\alpha = c \cdot f, \quad (3.36)$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Для обоснования другого допущения исследуем характер взаимодействия микровыступов сопряжения при неустойчивой работе подшипника (рис. 3.22) [26].

В условиях гидродинамической смазки и значений толщины масляной пленки, при которых не происходит касания микронеровностей пары трения, коэффициент трения f сопряжений будет равен коэффициенту жидкостного трения $f_{ж}$. Величина масляного слоя h_0 при таких условиях не будет меняться (линия 1 на рис. 3.22).

При изменении условий работы, уменьшении толщины масляного слоя h_0 (кривая 2 на рис. 3.22) возникают условия полужидкостной смазки $\tau_{пж}$

(или $l_{пж}$) и вероятность контакта микровыступов P_{k1} . В таких условиях возникает приращение полужидкостного трения $f_{пж}$.

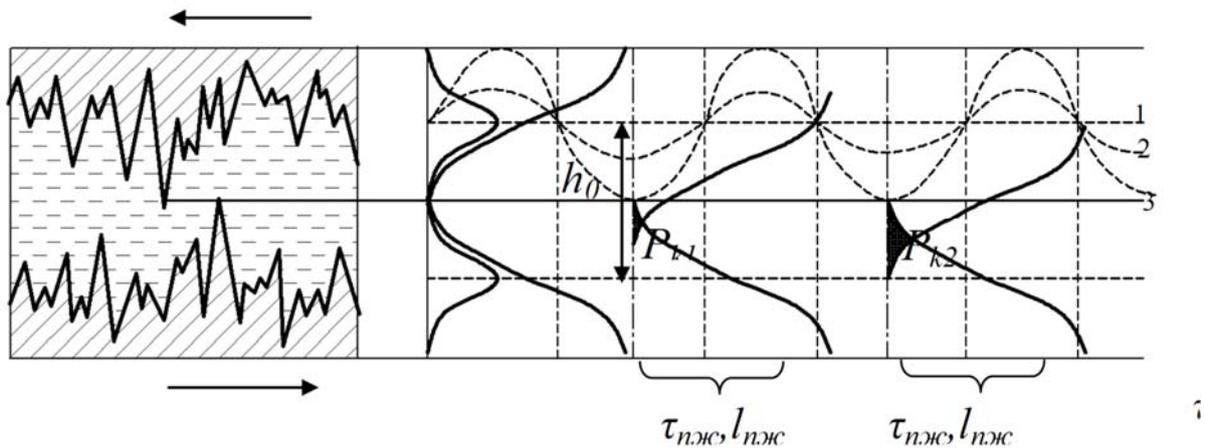


Рис.3.22. Схема взаимодействия микронеровностей поверхности трения при постоянном и переменном режимах (толщина масляной пленки h):
 $\tau_{пж}, l_{пж}$ – соответственно время работы и путь трения в полужидкостном режиме;
 P_{k1}, P_{k2} – вероятность взаимодействия микровыступов

Общий коэффициент трения при этом составит:

$$f = f_{ж} + f_{пж}. \quad (3.37)$$

С увеличением износа в сопряжении амплитуда колебаний повышается (кривая 3 на рис. 3.22), что повышает время работы сопряжения в условиях полужидкостной смазки $\tau_{пж}$ ($l_{пж}$) и вероятность контакта микровыступов P_{k2} , а также приращение $f_{пж}$. Принимая во внимание форму кривых распределения высоты микровыступов примем допущение о прямой пропорциональности увеличения зазора ΔS в сопряжении из-за износа и полужидкостного трения $f_{пж}$:

$$f = f_{ж} + c' \cdot \Delta S, \quad (3.38)$$

где c' – коэффициент пропорциональности.

Исходя из выражений (3.36) и (3.38) интенсивности изнашивания α :

$$\alpha = \alpha_0 + b \cdot \Delta S, \quad (3.39)$$

где $b = c \cdot c'$ – изменение интенсивности изнашивания на единицу приращения зазора (на единицу износа); α_0 – интенсивность изнашивания при устойчивом режиме работы подшипника (в конце периода приработки).

Зависимость интенсивности изнашивания элементов двигателя от наработки обоснована в работах проф. Ф.Н. Авдонькина [2, 3, 6], но он рассматривал увеличение зазора вследствие работы удара в сопряжениях. Анализ исследований работы подшипников скольжения с жидкостной смазкой показывает, что при обеспечении гидродинамических условий смазки удар в сопряжении невозможен из-за демпфирующих свойств масла

между поверхностями трения. Более того, работа удара является интегральным показателем, а интенсивность изнашивания – дифференциальным.

Зависимость (3.39) можно записать:

$$\alpha = \frac{dS}{dl} = \alpha_0 + b \cdot \Delta S. \quad (3.40)$$

После преобразований получим:

$$l = \int \frac{dS}{\alpha} = \int \frac{dS}{(\alpha_0 + b\Delta S)}. \quad (3.41)$$

Найдем неопределенный интеграл:

$$l = \frac{1}{b} \ln(\alpha_0 + b\Delta S) + c_u. \quad (3.42)$$

Постоянную интегрирования c_u определим из начальных условий:

$\Delta S = 0$ при $l = 0$:

$$c_u = -\frac{1}{b} \ln \alpha_0. \quad (3.43)$$

С учетом этого выражение (3.42) примет вид:

$$l = \frac{1}{b} \ln \frac{(\alpha_0 + b\Delta S)}{\alpha_0}. \quad (3.44)$$

Зависимость износа от пробега с учетом (3.44)

$$\Delta S_n = \frac{\alpha_{n0}}{b_n} (e^{b_n l} - 1). \quad (3.45)$$

Выражение $\frac{\alpha_{n0}}{b_n}$ – это значение износа в конце приработки S_{n0} , вследствие чего общий износ при наработке увеличивается по экспоненциальной зависимости:

$$S_n = S_{n0} e^{b_n l}, \quad (3.46)$$

интенсивность изнашивания с учетом зависимостей (3.40) и (3.45):

$$\alpha_n = \alpha_{n0} e^{b_n l}, \quad (3.47)$$

где α_{n0} , S_{n0} – соответственно интенсивность изнашивания и износ в конце приработки, приведенные к началу эксплуатации ($l=0$); b_n – изменение интенсивности изнашивания [16].

Таким образом, обоснованные зависимости могут быть теоретической основой прогнозирования изменения технического состояния подшипников

коленчатого вала и других динамически нагруженных сопряжений в процессе эксплуатации силового агрегата.

Для обеспечения надежной работы подшипников на всех режимах работы двигателя необходимо обеспечить два условия, вытекающих из физического анализа процесса:

Первое – чтобы производительность насоса не уменьшалась из-за снижения сопротивления в цепи (износов в сопряжениях), что частично выполнено на двигателях КамАЗ-Евро, до наработки 80-100 тыс. км.

Для этого необходимо создать на шейках коленчатых валов тонкий слой твердой смазки на основе меди, предотвращающей процессы схватывания при критических условиях работы сопряжения, и тем самым обеспечить условие положительного градиента механических свойств [79, 180, 232, 259, 314], согласно которому поверхность трения должна обладать меньшей прочностью, чем нижележащие слои, т.е. обеспечить наличие смазки (либо жидкостной, либо твердой) между трущимися поверхностями, для предотвращения процессов схватывания в сопряжении [79, 111, 173].

Второе – относится к механическому взаимодействию; это – условие минимального внедрения контактируемого тела в сопряженную поверхность [110, 118, 173].

Твердость шеек коленчатых валов должна быть высокой (50-55 HRC) при оптимальной шероховатости [73, 233].

Изменения в смазочной системе двигателей КамАЗ-Евро, по сравнению с базовым двигателем КамАЗ-740 (повышение производительности масляного насоса, использование теплообменника, совершенствование системы фильтрации, повышение исходного давления до 0,55 МПа и др.) позволили снизить задиры шеек коленчатых валов, но не устранить их совсем [123, 270].

3.3. Изменение технического состояния опор блока цилиндров

Нагрузки на опору блока цилиндров, воспринимаемые от коренных шеек коленчатого вала, отклонены от вертикали в обе стороны на 45° (рис. 3.23).

Следствием действия равнодействующей газовых сил Q является изменение размеров и формы коренной опоры блока. Горизонтальная составляющая равнодействующей силы Q_x образует изгибающий момент.

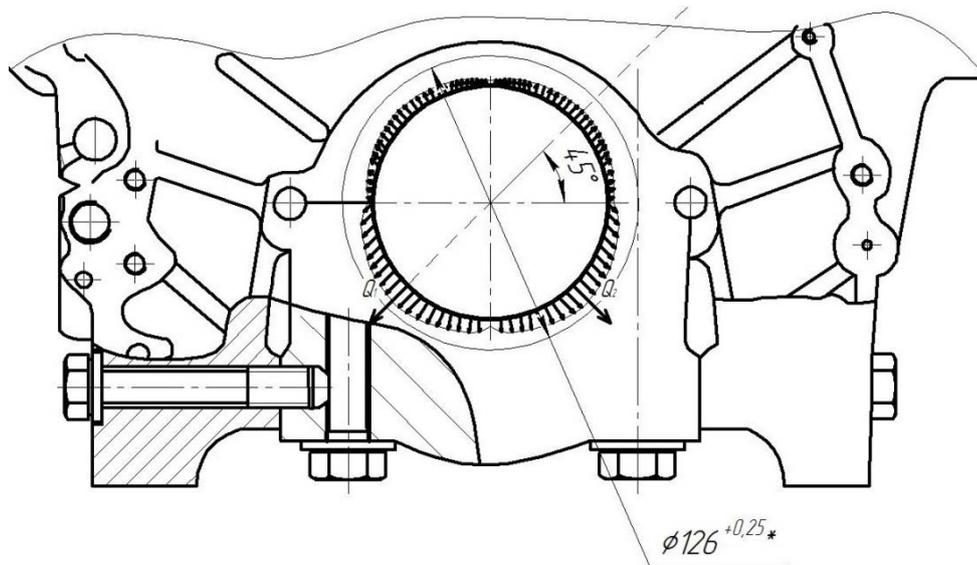


Рис. 3.23. Схема действия равнодействующих газовых сил Q

Это приводит к повышению зазора в сопряжении вал – вкладыш и увеличению динамических нагрузок на опору. Часть горизонтальной составляющей Q'_x :

$$Q'_x = Q_x f_{\text{тр}}, \quad (3.48)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения.

Наибольший изгибающий момент находится в плоскости разъема картера и крышки [14, 39]. Вследствие действия этих нагрузок происходит фреттинг-изнашивание в сопряжении картера и крышки опоры блока цилиндров, что изменяет размер и форму опоры (в виде овальности), а в сопряжении вкладыш и опора блока этот вид изнашивания проявляется в виде корсетности, аналогично как и в нижней головке шатунов.

Это приводит к уменьшению жесткости вкладыша и передачи нагрузки на опору блока цилиндров через упругий элемент (вкладыш). Поэтому здесь будут наблюдаться максимальные амплитуда вибраций и скорость изнашивания. Это подтверждается следами фреттинг-изнашивания на коренной опоре и на обратной стороне коренных вкладышей (рис. 3.24) [14].



Рис. 3.24. Фреттинг-изнашивание на крышке коренной опоры (а) и на обратной стороне коренного вкладыша (б)

В соответствии с обоснованными профессором Ф.Н. Авдонькиным зависимостями интенсивности изнашивания от износа:

$$\alpha_1 = \alpha_{01} + bS_1; \quad (3.49)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{02} + bS_2, \quad (3.50)$$

где α_1, α_2 – соответственно интенсивность изнашивания в вертикальной и горизонтальной плоскости, мкм/тыс. км; α_{01}, α_{02} – интенсивность изнашивания в конце приработки, мкм/тыс. км; b – изменение интенсивности изнашивания за единицу износа, 1/тыс. км; S_1, S_2 – износ, мкм.

Выражение для интенсивности овализации $\Delta\alpha$ будет иметь вид

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2, \quad (3.51)$$

или

$$\Delta\alpha = \alpha_{01} - \alpha_{02} + bS_1 - bS_2 = \Delta\alpha_0 + b(S_1 - S_2). \quad (3.52)$$

То есть интенсивность овализации $\Delta\alpha$ в процессе изнашивания возрастает прямо пропорционально величине овальности. Это приводит к увеличению овальности коренной опоры и ухудшению условий монтажа коренного вкладыша после замены, поэтому при ремонте необходимо контролировать и при необходимости устранять макрогеометрические отклонения в коренных опорах.

При увеличении динамических нагрузок, вследствие увеличения зазоров в сопряжении и достижения действующим напряжением предела текучести σ_T материала блока цилиндров, возникают условия начала пластического деформирования рабочих поверхностей опор, а при повышении температуры в трущемся сопряжении появляются такие свойства, как ползучесть материала. После снятия нагрузки в элементах опор блока цилиндра имеют место остаточные деформации и напряжения.

Общая деформация ε равна сумме деформаций упругости ε_y , пластичности $\varepsilon_{пл}$ и деформации ползучести $\varepsilon_{пол}$:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_{пол}. \quad (3.53)$$

Появление пластической деформации происходит как вследствие достижения действующими напряжениями предельных значений (предела текучести материала σ_T), так и вследствие ползучести в условиях повышенных температур. Ползучесть проявляется у углеродистых сталей и чугунов при температуре свыше 300°C . Существенным фактором является продолжительность работы детали в таких условиях. Если перемещения точек тела опоры блока остаются неизменными, то со временем изменяются напряжения, и имеет место чистая релаксация, проявляющаяся в образовании трещин в опоре блока, обычно в зоне концентрации напряжений – по отверстию масляного канала (рис. 3.25).

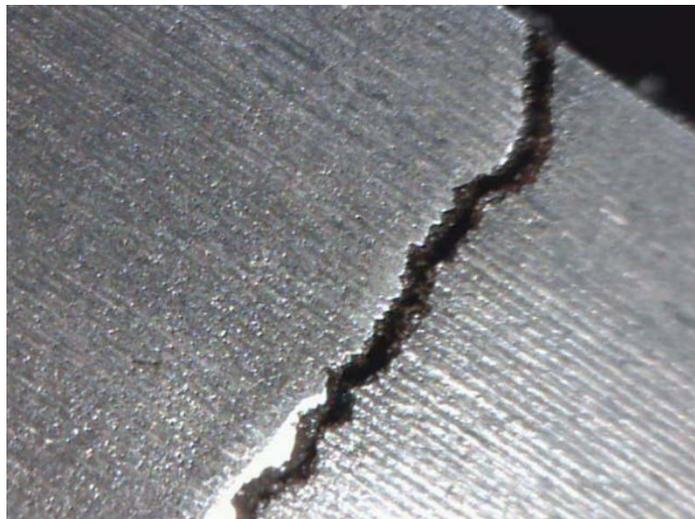


Рис. 3.25. Трещина в опоре блока (фотография сделана с микроскопа Webers W2C $\times 200$)

Классическая схема процесса ползучести, при постоянном во времени напряжении σ , представлена на рис. 3.26. Существует упругое и пластическое последствие.

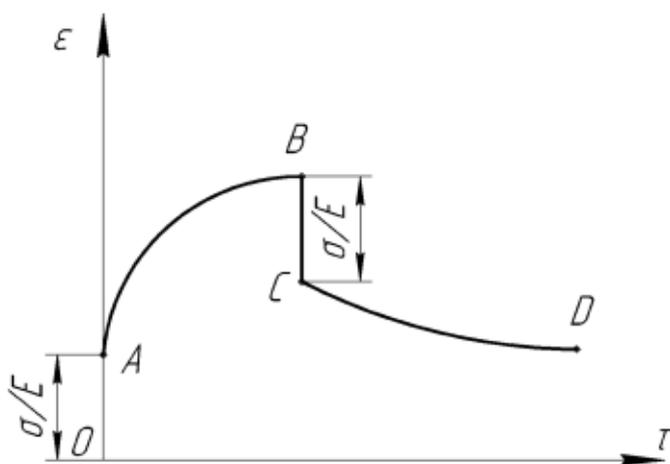


Рис. 3.26. Классическая кривая, иллюстрирующая пластическое последствие

В первом случае при снятии нагрузки (линия BC на рис. 3.26), деформации уменьшились бы до нуля, в случае пластического последствия, характерного для опор блока цилиндров они, затухая со временем, сохраняются (линия CD на рис. 3.26) [312].

В основе расчетов на ползучесть лежат данные экспериментов при одноосном напряженном состоянии на образцах при постоянной во времени нагрузке и температуре,

представленные в виде кривых ползучести на рис. 3.26.

Изменение размера и формы опоры блока цилиндров в процессе пластического деформирования происходит в нескольких стадиях при эксплуатации двигателя.

В первой стадии ползучести за счет механического упрочнения поверхностного слоя опоры скорость деформации ползучести ξ^c :

$$\xi^c = d\varepsilon / dt. \quad (3.54)$$

уменьшается до минимальной ξ_{\min}^c , которая сохраняется на протяжении длительного времени эксплуатации (второй стадии). Первая и особенно вторая стадии представляют наибольший интерес с точки зрения длительности работоспособности материала в условиях ползучести. В третьей стадии, заканчивающейся разрушением, поверхность теряет размер и форму, происходит перегрев сопряжения, проворот вкладыша (вязкое разрушение поверхности вследствие задиров), или образование внутренних трещин (хрупкое разрушение поверхности). С ростом напряжения и температуры продолжительность второй стадии уменьшается.

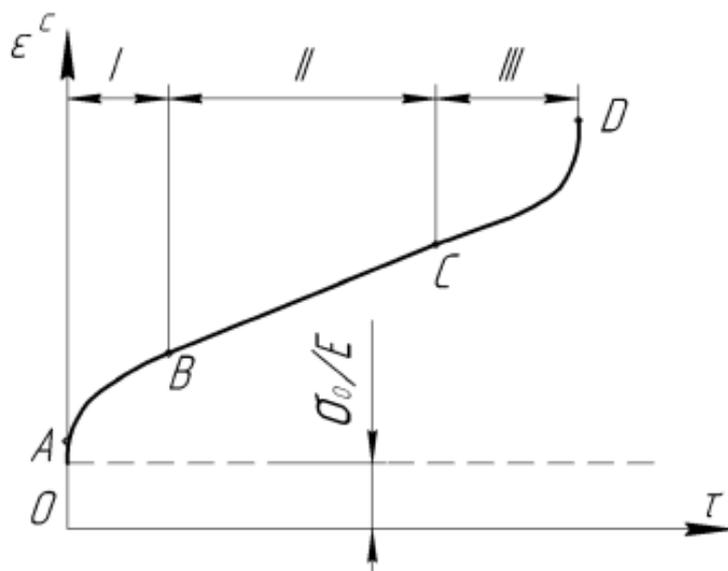


Рис. 3.27. Кривая ползучести:
I-II-III – стадии

Минимальная скорость ползучести ξ_{\min}^c зависит от напряжения σ и температуры T :

$$\xi_{\min}^c = Q(\sigma)\theta(T). \quad (3.55)$$

Существуют различные представления функции $Q(\sigma)$. Чаще других используется выражение [312]:

$$Q(\sigma) = k\sigma^n, \quad (3.56)$$

где k и n – коэффициенты, зависящие от температуры и определяемые экспериментально [312].

Для жаропрочных сталей n колеблется в пределах 3–6. Диапазон изменения k значительно шире. Так, для стали ЭИ 69 (45X14H14B2M) k меняется от $2,0 \cdot 10^{10} (1/\text{МПа})^n/\text{ч}$ при 600°C до $1,24 \cdot 10^{-8} (1/\text{МПа})^n/\text{ч}$ при 700°C [180].

Деформация ползучести ε^c определяется по формуле

$$\varepsilon^c = Q\Omega'\theta, \quad (3.57)$$

где Q – функция напряжения; Ω' – функция времени; θ – функция температуры.

Деформации ползучести являются, как правило, необратимыми. Поэтому при расчетах на ползучесть для неодноосного напряженно-деформированного состояния используется ряд приведенных выше гипотез теории пластичности. Практические расчеты проводят с помощью, так называемых технических (простейших) теорий ползучести. Последние предполагают наличие соотношений (уравнений), описывающих процесс деформирования материала во времени, в том числе при переменных режимах работы. Технические теории формулируются для одноосного напряженного состояния с последующим обобщением применительно к неодноосному напряженно-деформированному состоянию [312].

Для повышения прочностных характеристик при высоких температурах стали легируют никелем.

Анализ напряженно-деформированного состояния коренной опоры блока цилиндров методом конечных элементов, используя твердотельное моделирование с автоматическим построением конечно-элементной сетки, показан на рис. 3.28.

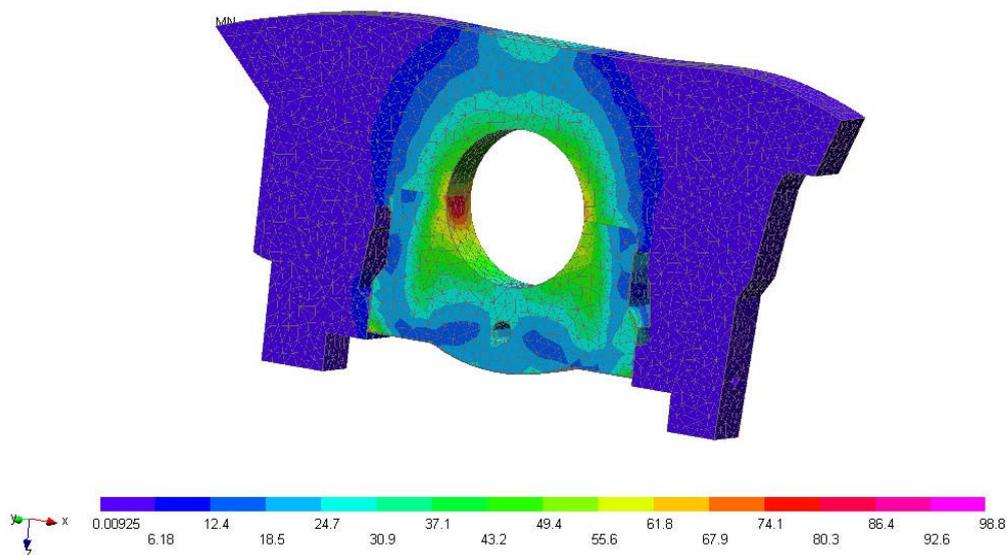


Рис. 3.28. Распределение напряжений σ_z (МПа) в коренной опоре блока цилиндров КамАЗ-740

Из рис. 3.28 видно, что поля напряжений в коренной опоре блока цилиндров КамАЗ-740 отличаются значительной неравномерностью распределения, наибольшие напряжения находятся в нижней части бугеля по направлениям действия равнодействующих газовых сил и составляют 55-60 МПа, в верхней части опоры напряжения от действия инерционных сил составляют 37-45 МПа [39].

3.4. Изменение технического состояния турбокомпрессора

Другим ресурсоопределяющим элементом силового агрегата, на который приходится до 7% от общего числа отказов, является турбокомпрессор (ТКР). При этом средняя наработка на отказ составляет 41550 км [16, 130, 131, 249]. На двигателях КамАЗ устанавливаются ТКР модели ТКР 7Н, ТКР 7С-6 или ТКР S2B/7624TAE/0,76D9 фирмы «BorgWarner Turbo Systems».

Проведенные исследования по анализу отказов турбокомпрессоров как отечественного, так и импортного производства показывают, что основной причиной выхода турбокомпрессора из строя является его высокая теплонапряженность [11, 15, 16, 203]. При работе турбинная часть ТКР нагревается выхлопными газами, температура которых достигает 700 °С и выше [16, 203, 248, 249], основную часть этого тепла берут на себя чугунная улитка и крыльчатки турбинного колеса. За счет высокой теплопроводности материалов улитки и корпуса подшипников тепло передается в подшипниковый узел.

Отвод тепла от чугунной улитки ТКР осуществляется в окружающую среду обдуваемым воздухом, подшипниковый узел охлаждается циркулирующим маслом.

Масло для смазывания и охлаждения ТКР подается через плавающие подшипники скольжения, в которых вал вращается с частотой 100-110 тыс. мин⁻¹.

Окружная скорость составляет:

$$V = \omega r = \frac{\pi n}{30} \cdot r = \frac{3.14 \cdot 100000}{30} \cdot 0,0055 = 57,5 \text{ м/с}, \quad (3.58)$$

где ω – угловая скорость, рад/с; r – радиус, м; n – частота вращения, мин⁻¹.

Часть энергии вращения вала ротора расходуется на преодоление сопротивления трения масла [16]. Работа трения при этом пропорциональна квадрату окружной скорости V [232, 265, 276]:

$$A_{\text{тр}} = cV^2, \quad (3.59)$$

где c – константа, определяемая конструктивно-технологическими параметрами узла трения и свойствами смазочного материала.

Определяющим фактором, влияющим на надежность турбокомпрессора, если рассматривать температуру деталей, является теплонапряженность подшипникового узла. Особенно этот фактор проявляется при остановке двигателя, когда прекращается охлаждение турбинной улитки обдуваемым воздухом, а подшипникового узла циркулирующим маслом [10, 11, 16, 32]. Это обусловлено передачей большей части тепловой энергии от нагретой турбинной улитки в подшипниковый узел.

Температура подшипникового узла (рис. 3.29) значительно повышается, достигая величины 300 °С, остатки масла на трущихся поверхностях

коксуется, происходит коагуляция с выделением твердых частиц, схватывание смолистыми отложениями уплотнительных колец с валом.

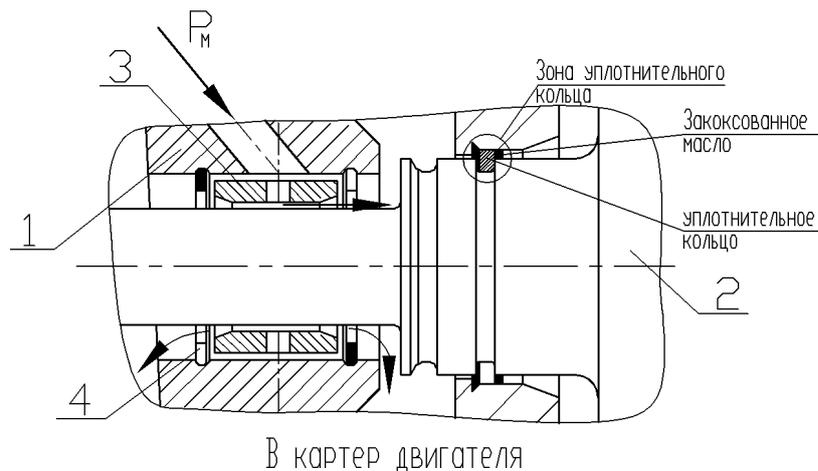


Рис. 3.29. Подшипниковый и уплотнительный узел турбокомпрессора ТКР7С

Загрязнение масла выделившимися твердыми частицами (при коагуляции масла) приводит к износу вала ротора, упорных подшипников, статора, внутренних и наружных поверхностей плавающих вращающихся частей подшипников (гидроабразивное изнашивание) (рис. 3.30).

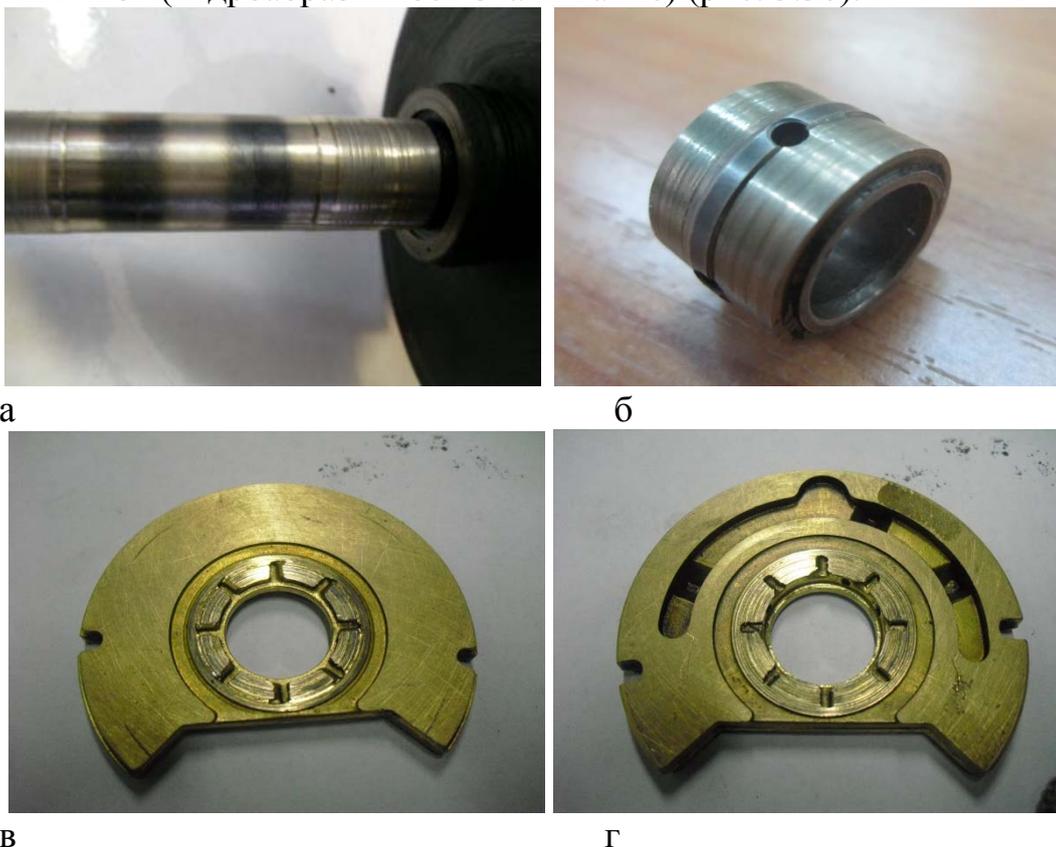


Рис. 3.30. Износ вала ротора (а), наружных поверхностей плавающего (б) и упорного (в, г) подшипников

К факторам, влияющим на состояние ТКР, можно отнести и свойства масла.

При повышенной вязкости масла в холодное время года создается дополнительное сопротивление вращению вала ротора, которое значительно (в 20-30 раз) выше, чем на прогретом двигателе [265].

В процессе работы в гидравлическом подшипнике на вал действует сжимающее усилие [264]:

$$F = P \cdot S = P \cdot L \cdot \pi \cdot d, \quad (3.60)$$

где P – давление масла; L – длина полости; d – диаметр вала ротора.

Усилие для преодоления сопротивления вращению вала ротора турбокомпрессора превышает 380 Н (зависит от вязкостных свойств масла и температуры).

Средняя температура масла находится из уравнения теплового баланса:

$$N_{mp} = N_Q + N_{me}, \quad (3.61)$$

где N_{mp} – мощность трения, приходящаяся на обобщенную пару трения; N_Q – потери мощности трения вследствие истечения рабочей жидкости через зазоры гидродинамической системы; N_{me} – потери мощности трения вследствие теплоотдачи и лучеиспускания через поверхность корпуса обобщенной пары трения, т.е. гидродинамической подсистемы.

В соответствии с [174] мощность трения при перемещении пар трения со скоростью w под действием момента M_{mp} определяется из выражения:

$$N_{mp} = M_{mp} w = P_m \cdot f_{mp} \cdot r \cdot L \cdot d \cdot w, \quad (3.62)$$

где f_m – коэффициент трения; P_m – среднее давление в паре трения; L – длина пары трения; d – диаметр подшипника; r – радиус подшипника.

Потери мощности трения вследствие истечения рабочей жидкости:

$$N_Q = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T \cdot k, \quad (3.63)$$

где c – теплоемкость масла; ρ – плотность масла; ΔT – приращение температуры масла; k – механический эквивалент теплоты; Q – количество масла, протекающего через обобщенный зазор пары трения.

Потери мощности трения вследствие отдачи тепла в окружающую среду [134]:

$$N_{me} = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot \Delta T \cdot w \cdot k, \quad (3.64)$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

Из описанных выражений (3.62), (3.63), (3.64) получим:

$$P_m \cdot f_{mp} \cdot r \cdot L \cdot d \cdot w = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T \cdot k + \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot w \cdot k \quad (3.65)$$

или
$$f_{mp} \cdot P_m \cdot r \cdot L \cdot d \cdot w = k \Delta T (c \cdot \rho \cdot Q + \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot w). \quad (3.66)$$

Из уравнения (3.66) видно, что мощность трения зависит от температуры масла и, снижая ее, увеличив расход масла, можно уменьшить теплонапряженность деталей и трение в подшипнике [16].

О высокой температуре на деталях турбокомпрессора можно судить по смолистым отложениям на них, а также по наличию на деталях цветов побежалости (рис. 3.30), что говорит о нагреве элемента выше 300 °С.

При повышении температуры более 150 °С у большинства масел начинают испаряться летучие составляющие. Это сопровождается образованием смолистых отложений и потерей смазочных качеств. Увеличиваются окисление масла и потеря его щелочности, что сказывается на долговечности турбокомпрессора и всего силового агрегата в целом [95, 265].

Анализ аккумулялирования тепла и его обмена в элементах турбокомпрессора предположил пути решения задачи по снижению теплонапряженности подшипникового узла турбокомпрессора.

Чтобы качественно оценить динамику роста температуры по времени и по величине, решим уравнение теплового баланса при некоторых допущениях [311, 322]:

первое – после остановки двигателя отводимая температура от корпуса турбинной улитки снижается линейно;

второе – после остановки двигателя масло не отводит тепло от подшипникового узла;

третье – температура окружающей среды во времени постоянна.

Уравнение теплового баланса для корпуса турбины и подшипника [16, 32]:

1. Для корпуса турбины:

$$c_1 m_1 \frac{dT_T}{d\tau} = -q_{OT}, \quad (3.67)$$

где c_1 – удельная теплоёмкость материала корпуса турбины, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; m_1 – масса турбины, кг; T_T – температура корпуса турбины, °С; τ – время, с; q_{OT} – отвод тепла от турбины подшипнику и окружающей среде:

$$q_{OT} = q_{П} + q_{ОКР}, \quad (3.68)$$

где $q_{П}$ – тепло, отведенное к подшипнику; $q_{ОКР}$ – тепло, отведенное в окружающую среду.

Эти величины определяются соответственно из выражений:

$$q_{П} = \alpha_1 F_1 (T_T - T_{П}), \quad (3.69)$$

$$q_{ОКР} = \alpha_2 F_2 (T_T - T_{ОКР}), \quad (3.70)$$

где F_1, F_2 – площадь поверхности отвода тепла от турбины к подшипнику, от турбины к окружающей среде, соответственно, м²; $T_T, T_{П}, T_{ОКР}$ – температуры, соответственно, турбины, подшипника, окружающей среды, °С.

2. Для подшипника:

$$c_2 m_2 \frac{\partial T_{П}}{\partial \tau} = q_{П} - q_{ОКР_П}, \quad (3.71)$$

где c_2 – удельная теплоёмкость материала подшипника, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; m_2 – масса подшипника, кг; $q_{ОКР_П}$ – отвод тепла от подшипника в окружающую среду:

$$q_{ОКР_П} = \alpha_3 F_3 (T_{П} - T_{ОКР}), \quad (3.72)$$

где F_3 – площадь поверхности отвода тепла от подшипника в окружающую среду, m^2 .

Принимая, что q_{II} в уравнениях (3.69) и (3.71) – величина постоянная, решим дифференциальные уравнения с использованием программного средства «Matlab 6.5» [319]. Решение этой системы уравнений теплового баланса даёт следующие выражения для температур корпуса турбины и подшипника соответственно:[15, 16, 18, 20]:

– для корпуса турбины:

$$T_T = -\frac{1}{2} \left(-2T_{OKP} a_1 F_1 c_2 - \frac{1}{2} \frac{ED a_1 F_1 c_2}{\sqrt{A}} - \frac{1}{2} \frac{ED a_2 F_2 c_2}{\sqrt{A}} + \frac{1}{2} \frac{Ec_1 D a_1 F_1}{\sqrt{A}} + \frac{1}{2} \frac{Ec_1 a_3 F_3 D}{\sqrt{A}} - \frac{1}{2} ED + \frac{1}{2} \frac{CB a_1 F_1 c_2}{\sqrt{A}} + \frac{1}{2} \frac{Ca_2 F_2 B c_2}{\sqrt{A}} - \frac{1}{2} \frac{Cc_1 B a_1 F_1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{2} \frac{Cc_1 a_3 F_3 B}{\sqrt{A}} - \frac{1}{2} CB \right) / (a_1 F_1 c_2) \quad (3.73)$$

– для подшипника:

$$T_{II} = T_{OKP} + \frac{1}{2} \left(-\sqrt{A} T_{OKP} - T_{OKP} a_1 F_1 c_2 - a_1 F_1 c_2 T_{TH} + a_2 F_2 c_2 T_{OKP} - a_2 F_2 c_2 T_{TH} - c_1 a_1 F_1 T_{OKP} + c_1 a_1 F_1 T_{TH} - c_1 a_2 F_3 T_{OKP} + c_1 a_3 F_3 T_{TH} + \sqrt{A} T_{TH} + 2T_{II} a_1 F_1 c_2 \right) \times e^{\left(\frac{1}{2} \frac{t a_1 F_1}{c_2} - \frac{1}{2} \frac{t a_2 F_2}{c_1} - \frac{1}{2} \frac{t a_3 F_3}{c_2} - \frac{1}{2} \frac{t a_1 F_1}{c_1} + \frac{1}{2} \frac{t \sqrt{A}}{c_1 c_2} \right)} / \sqrt{A} - \frac{1}{2} \left(-T_{OKP} a_1 F_1 c_1 - a_1 F_1 c_2 T_{TH} + a_2 F_2 c_2 T_{OKP} - a_2 F_2 c_2 T_{TH} - a_1 F_1 c_1 T_{OKP} + c_1 a_1 F_1 T_{TH} - c_1 a_3 F_3 T_{OKP} + c_1 a_3 F_3 T_{TH} + \sqrt{A} T_{OKP} - \sqrt{A} T_{TH} + 2T_{II} a_1 F_1 c_2 \right) \times e^{\left(\frac{1}{2} \frac{t a_1 F_1}{c_2} - \frac{1}{2} \frac{t a_2 F_2}{c_1} - \frac{1}{2} \frac{t a_3 F_3}{c_2} - \frac{1}{2} \frac{t a_1 F_1}{c_1} + \frac{1}{2} \frac{t \sqrt{A}}{c_1 c_2} \right)} / \sqrt{A}, \quad (3.74)$$

где T_{TH} , T_{II} – начальные температуры, соответственно, корпуса турбины и подшипника, $^{\circ}C$; t – время с момента остановки двигателя, с; A , B , C , D , E – коэффициенты, учитывающие взаимосвязи между конструктивными параметрами ТКР (материал, масса деталей, площадь их поверхностей).

Эти коэффициенты, представляют собой сложные выражения, определяемые следующими выражениями:

– для корпуса турбины:

$$A = c_1^2 a_1^2 F_1^2 - 2c_1 a_1 F_1 a_2 F_2 c_2 + 2c_1^2 a_1 F_1 a_3 F_3 + 2c_1 a_1^2 F_1^2 c_2 + a_2^2 F_2^2 c_2^2 - 2a_2 F_2 c_1 a_3 F_3 + 2a_2 F_2 c_2^2 a_1 F_1 + c_1^2 a_3^2 F_3^2 - 2c_1 a_3 F_3 a_1 F_1 c_2 + a_1^2 F_1^2 c_2^2. \quad (3.75)$$

$$B = e^{\left(\frac{1}{2} \frac{ta_1 F_1}{c_2} - \frac{1}{2} \frac{ta_2 F_2}{c_1} - \frac{1}{2} \frac{ta_3 F_3}{c_2} - \frac{1}{2} \frac{ta_1 F_1}{c_1} + \frac{1}{2} \frac{t\sqrt{A}}{c_1 c_2} \right)} \quad (3.76)$$

$$C = -T_{OKP} - a_1 F_1 c_2 T_{THAЧ} + a_2 F_2 c_2 T_{OKP} - a_2 F_2 c_2 T_{TH} - c_1 a_1 F_1 T_{OKP} + \\ + c_1 a_1 F_1 T_{TH} - c_1 a_3 F_3 T_{OKP} + c_1 a_3 T_{TH} + \sqrt{A} T_{TH} + 2T_{ПН} a_1 F_1 c_2 \quad (3.77)$$

$$D = e^{\left(\frac{1}{2} \frac{ta_1 F_1}{c_2} - \frac{1}{2} \frac{ta_2 F_2}{c_1} - \frac{1}{2} \frac{ta_3 F_3}{c_2} - \frac{1}{2} \frac{ta_1 F_1}{c_1} + \frac{1}{2} \frac{t\sqrt{A}}{c_1 c_2} \right)} \quad (3.78)$$

$$E = -\sqrt{A} T_{OKP} - T_{OKP} a_1 F_1 c_2 - a_1 F_1 c_2 T_{TH} + a_2 F_2 c_2 T_{OKP} - a_2 F_2 c_2 T_{TH} - \\ - c_1 a_1 F_1 T_{OKP} + c_1 a_1 F_1 T_{TH} - c_1 a_3 F_3 T_{OKP} + c_1 a_3 F_3 T_{TH} + \sqrt{A} T_{TH} + 2T_{ПН} a_1 F_1 c_2 \quad (3.79)$$

– для подшипника:

$$A = c_1^2 a_1^2 F_1^2 - 2c_1 a_1 F_1 a_2 F_2 c_2 + 2c_1^2 a_1 F_1 a_3 F_3 + 2c_1 a_1^2 F_1^2 c_2 + \\ + a_2^2 F_2^2 c_2^2 - 2a_2 F_2 c_2 c_1 a_3 F_3 + 2a_2 F_2 c_2^2 a_1 F_1 + c_1^2 a_3^2 F_3^2 - \\ - 2c_1 a_3 F_3 a_1 F_1 c_2 + a_1^2 F_1^2 c_2^2 \quad (3.80)$$

Определим коэффициенты a_i , c_i , F_i на примере турбокомпрессора ТКР 7С-6.

Подшипники изготовлены из бронзы БрО10С10. Корпус подшипников отлит из чугуна марки ВЧ 50, крышка изготовлена из алюминиевого сплава.

Для определения влияния режима работы силового агрегата перед его остановкой на теплонапряженность элементов ТКР, исследования проводили при нескольких значениях температуры отработавших газов.

Выбор параметров режима двигателя, при котором осуществлялась его остановка, принимался из учета основных режимов работы силового агрегата, при которых возможна его остановка в процессе эксплуатации и на основании ранее проведенных исследований [16].

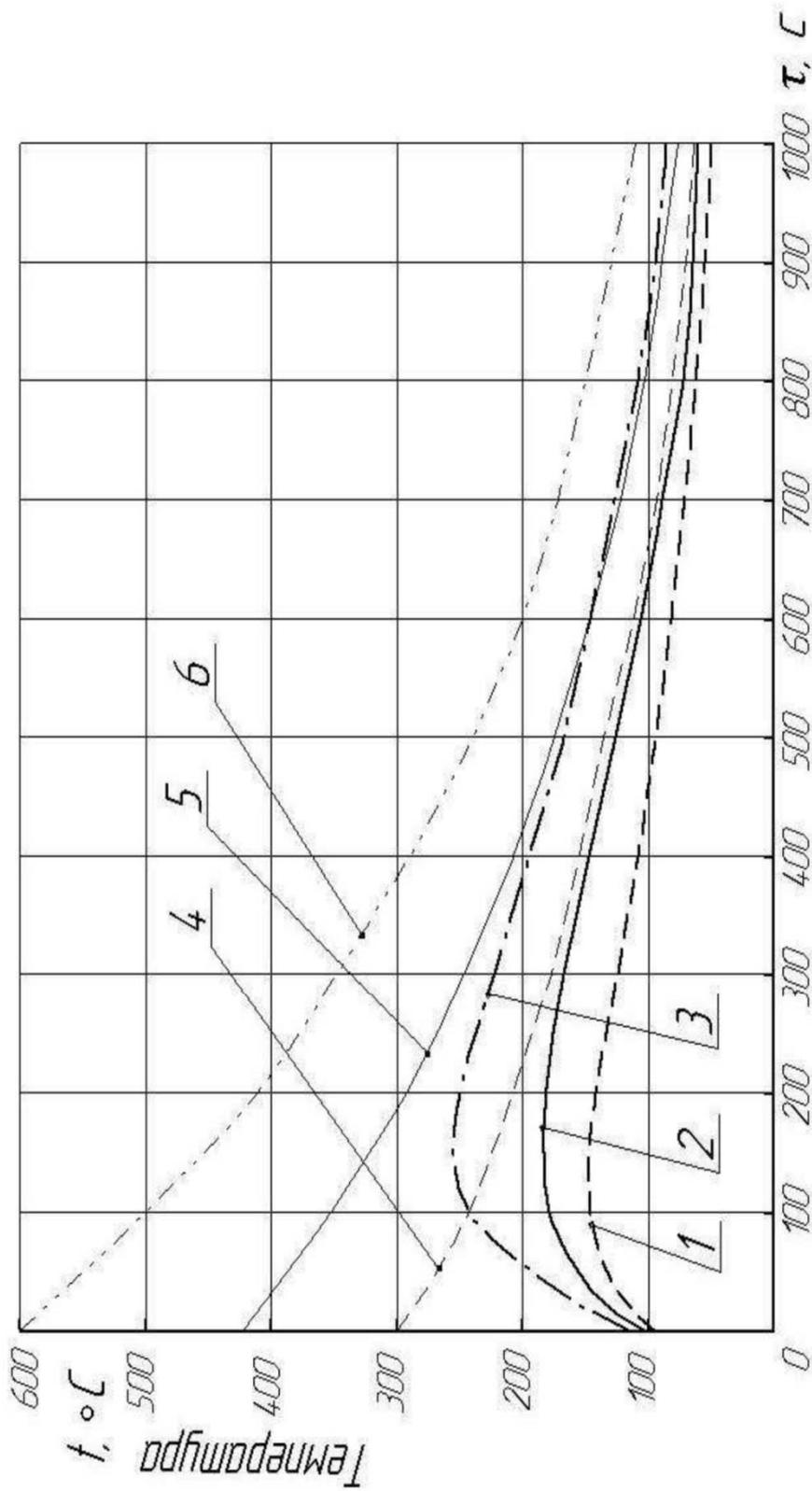
– $t_{\text{выхл}} = 300$ °С – при минимальной частоте вращения коленчатого вала и работе без нагрузки;

– $t_{\text{выхл}} = 420$ °С – при номинальной частоте вращения коленчатого вала и работе с умеренной нагрузкой;

– $t_{\text{выхл}} = 600$ °С – при номинальной частоте вращения коленчатого вала и работе с полной нагрузкой [16, 32].

Результаты исследований приведены на рис. 3.31.

Анализ зависимостей, показывает, что с момента остановки двигателя при интервале времени от 0 до 160 с., повышается температура подшипникового узла. Принимая это во внимание, а также то, что выражения (3.73) и (3.74) достаточно сложны, аппроксимируем полученные выражения в интервале, исследуемых значений температур [16].



Время с момента остановки двигателя

Рис. 3.31. Теоретическая зависимость температур корпуса турбины и подшипника от времени с момента остановки двигателя при различных значениях температуры выхлопных газов:
 $t_{\text{выхл}} = 300, 420$ и 600 °С; 1,2,3 – температура подшипника при $t_{\text{выхл}} = 300, 420$ и 600 °С соответственно;
 4,5,6 – температура турбины при $t_{\text{выхл}} = 300, 420$ и 600 °С соответственно

Для аппроксимации применяли полином второй степени:

$$T = a + b \cdot \tau + c \cdot \tau^2, \quad (3.81)$$

где a , b и c – параметры аппроксимирующего полинома.

Аналогично исследовались три характерных случая режима работы двигателя, полученные результаты отражены на рис. 3.32 и в табл. 3.1.

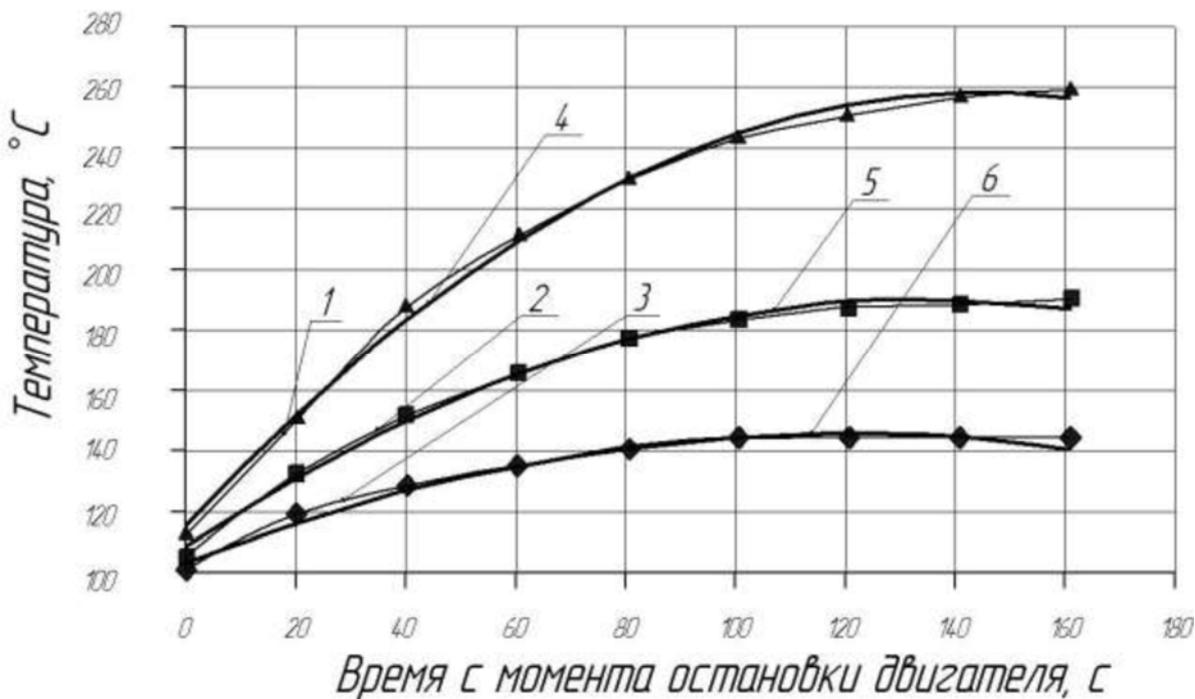


Рис.3.32. Аппроксимация зависимостей температуры подшипникового узла от времени с момента останова для различных начальных условий:
 1, 2, 3 – аналитические кривые для начальных условий в зависимости от температуры выхлопных газов ($t_{\text{выхл}}$ – 600, 420 и 300 °С, соответственно);
 4, 5, 6 – аппроксимирующие кривые для начальных условий в зависимости от температуры выхлопных газов ($t_{\text{выхл}}$ – 600, 420 и 300 °С, соответственно)

В результате исследования получены зависимости теплонапряженности элементов турбокомпрессора со времени остановки силового агрегата. Температура корпуса турбокомпрессора, через 2 минуты после остановки двигателя достигает 260° С . Такая высокая температура деталей в значительной степени влияет на ресурс турбокомпрессора и всего двигателя в целом [11].

О достаточной точности результатов исследования говорит величина достоверности $R^2 > 0,99$ [16].

Т а б л и ц а 3.1

Параметры аппроксимирующих полиномов

№ п/п	Начальные условия $t_{\text{выхл}}$, °С	a	b	c	τ_{max} , С
1	300	105,83	0,6167	-0,0025	147
2	420	107,21	1,2058	-0,0045	133,9
3	600	109,23	2,0593	-0,0073	123,34

Полученные результаты позволяют оценить влияние высокой теплонапряженности турбокомпрессора на его ресурс [11].

В процессе исследования выявлено, что после остановки силового агрегата вал ротора турбокомпрессора вращается некоторое время (18-30 с), без смазывания трущихся поверхностей (выбег вала ротора). По продолжительности времени выбега можно говорить о техническом состоянии турбокомпрессора, т.е. время выбега может являться диагностическим параметром

Время вращения вала ротора после остановки силового агрегата зависит от режима работы двигателя, на котором произошла остановка, но в большей степени зависит от состояния подшипникового узла (износа сопряжения, зазоров) [16].

Для аналитического описания времени выбега вала ротора турбокомпрессора исходили из того, что момент трения в подшипнике скольжения пропорционален режиму жидкостного трения, при не изменяющихся значениях температуры и скорости вращения вала [16, 20].

$$M_{тр} = f\omega, \quad (3.82)$$

где ω – угловая скорость вала ротора; f – степень влияния ω на коэффициент трения.

Вследствие того, что изменения в моментах сопротивления у колес турбиной и компрессорной частях турбокомпрессора незначительны, то выражение ускорения ε вала можно представить, как:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{d\tau} = -\frac{1}{j}(M_T + M_K + f\omega), \quad (3.83)$$

где j – момент инерции вала ротора и колёс.

Решая уравнение (3.83) при принятии, что $\omega = \omega_0$ при $\tau = 0$ получим зависимость ε и ω от τ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{f}{j}\tau}, \quad (3.84)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon_0}{f} e^{-\frac{f}{j}\tau} - \frac{(M_T + M_K)}{f}, \quad (3.85)$$

где $\varepsilon_0 = -\frac{1}{j}(M_T + M_K + f\omega_0)$ – ускорение (замедление) в начальный момент времени ($\tau = 0$).

Время (продолжительность) выбега τ_B определяется из выражения (3.85) при условии $\omega = 0$. После логарифмирования и преобразований получим:

$$\tau_B = \frac{j}{f} \ln \left(\frac{-\varepsilon_0 j}{M_T + M_K} \right). \quad (3.86)$$

Из выражения (3.86) видно, что время вращения вала ротора турбокомпрессора после остановки силового агрегата зависит от режима

работы двигателя перед его остановкой и технического состояния турбокомпрессора (вала ротора и подшипникового узла).

При небольшой частоте вращения вала ротора не обеспечиваются условия гидродинамического трения, стабильность жидкостного потока прекращается, вал начинает прецессировать, касаясь о стенки подшипника, что снижает скорость его вращения до полной остановки.

Исходя из этого выражение (3.85) запишем:

$$\omega = \omega_0 e^{-at} - \omega_n, \quad (3.87)$$

где ω_n – снижение угловой скорости вала ротора из-за нарушения условий смазки; a – конструктивный и режимный параметр.

Из уравнения (3.87) время выбега вала ротора при $\omega = 0$ будет иметь вид:

$$\tau_B = \frac{1}{a} \ln \frac{\omega_n}{\omega_0}. \quad (3.88)$$

Сила трения T , противодействующая движению вала будет определяться из суммы сил сдвига масла по окружающей поверхности вала ротора [16, 20].

Сила T пропорциональна площади сдвига ($\pi \cdot d \cdot l$), вязкости масла η , скорости сдвига v и обратно пропорциональна толщине h масляного слоя.

$$T = \frac{\pi d \cdot l \cdot \eta \cdot \omega d}{S} = \frac{\pi d \cdot l \cdot \eta \omega}{\psi} \quad (3.89)$$

Это показывает линейный характер между угловой скоростью ω вращения вала, силой трения T и зазором S в сопряжении. Исходя из этого, между временем вращения вала ротора турбокомпрессора после остановки силового агрегата и зазором в сопряжении имеется логарифмическая зависимость.

Из чего следует, что время выбега вала ротора, как и зазор в сопряжении, является диагностическим параметром его технического состояния [16]. Уравнение (3.88) можно записать как:

$$\tau_B = \frac{1}{a} \ln \frac{S_n}{S_l}, \quad (3.90)$$

где S_n – предельный зазор; S_l – текущее значение зазора.

С учётом зависимости износа от наработки, полученные проф. Ф.Н. Авдоськиным [3, 6]:

$$\tau_B = \frac{1}{a} \ln \frac{S_n}{S_0 e^{bl}} = \frac{1}{a} (\ln \frac{S_n}{S_0} - b \cdot l), \quad (3.91)$$

или, введя обозначения $A = \frac{1}{a} \ln \frac{S_n}{S_0}$ и $B = \frac{b}{a}$, получим:

$$\tau_B = A - B \cdot l \quad (3.92)$$

Исследования показывают, что по мере наработки время выбега вала турбокомпрессора уменьшается и имеет линейный характер (3.92), зависящий от режимов работы силового агрегата [16, 32].

При остановке двигателя температура подшипникового узла увеличивается, что повышает вероятность схватывания закоксовавшимся маслом уплотнительных колец с валом. Кроме того, из-за высоких температур в корпусе турбокомпрессора создаются термические напряжения и наблюдаются явления ползучести материала. В большей степени это проявляется в наиболее нагретой части корпуса подшипника, где и происходят пластические деформации.

Для моделирования деформаций корпуса турбокомпрессора проведено исследование его теплонапряженности [11, 32]. Основными исходными данными для расчета деформаций корпуса являются температурные поля, полученные в ходе экспериментальных исследований [203]. Для решения поставленной задачи использовали твердотельное моделирование с автоматическим построением конечно-элементной сетки (рис. 3.33) [11].

Модель состоит из 151690 квадратичных тетраэдральных элементов и содержит 29768 узлов.

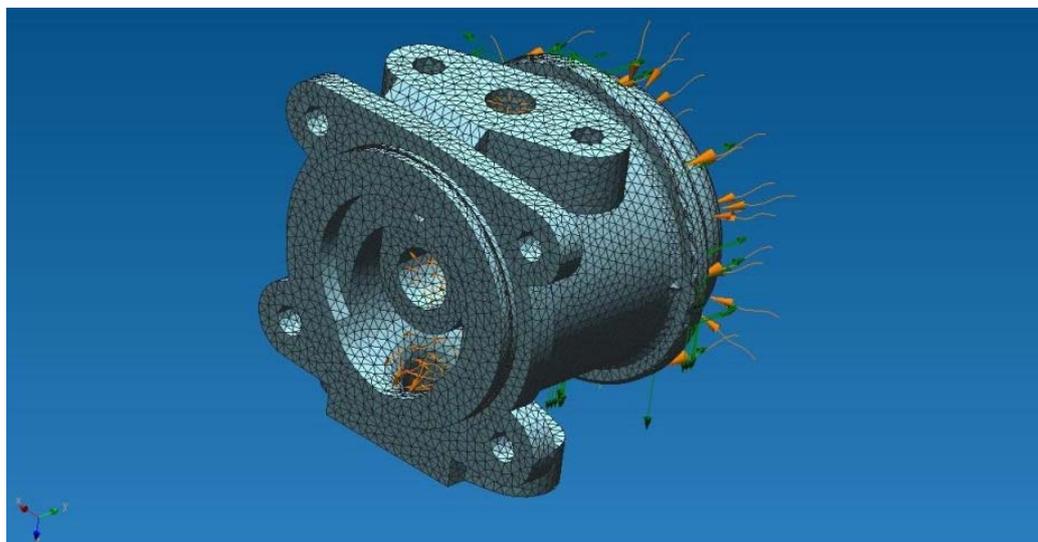


Рис. 3.33. Трехмерная конечно-элементная модель корпуса турбокомпрессора ТКР7С-6

Анализ теплонапряженного состояния корпуса турбокомпрессора подтверждает результаты исследования деформации деталей агрегата, рассеивание размеров и формы отверстий под посадочные поверхности подшипников, вследствие действия высоких температур в процессе эксплуатации. Поля тепловых напряжений в корпусе турбокомпрессора отличаются значительной неравномерностью распределения, вследствие этого наибольшие деформации (рис. 3.34) находятся в средней части подшипникового корпуса, соединенного с турбинной улиткой, обдуваемой выхлопными газами.

Рассматриваемый процесс изменения геометрической формы носит стохастический характер. Для его математического выражения примем следующие допущения [16]:

– о линейной зависимости остаточной деформации δ превышения предела ползучести $P(\sigma_{\text{п}})$ в виде:

$$\delta = \delta_0 + bP(\sigma_{\text{п}}), \quad (3.93)$$

где b – коэффициент пропорциональности; δ_0 – остаточная деформация от других факторов при $P(\sigma_{\text{п}}) = 0$.

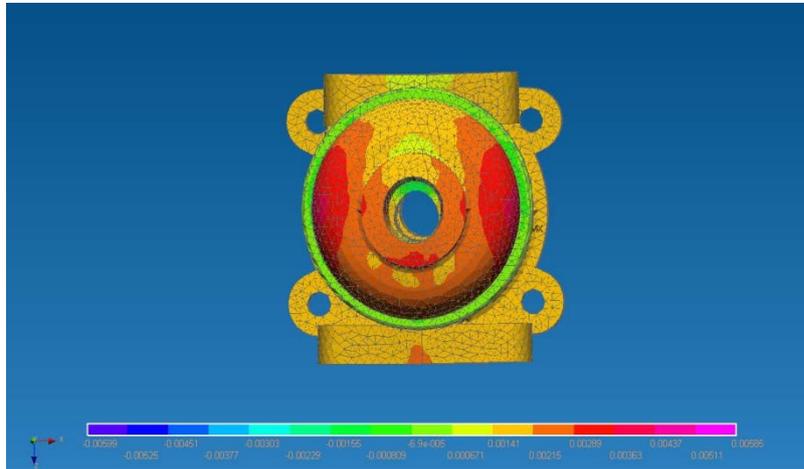


Рис. 3.34. Распределение деформаций в корпусе подшипников турбокомпрессора

– о линейной зависимости предела ползучести $\sigma_{\text{п}}$ от температуры T в виде

$$\sigma_{\text{п}} = \sigma_{\text{п}0} - b'T, \quad (3.94)$$

где $\sigma_{\text{п}0}$ – предел ползучести при $T=0$; b' – коэффициент пропорциональности. Эти допущения обусловлены незначительными интервалами изменения T и $\sigma_{\text{п}}$. С учетом этих допущений проанализируем влияние T на $P(\sigma_{\text{п}})$, что поясняется рис. 3.35.

– о нормальном законе распределения напряжений сжатия в модели.

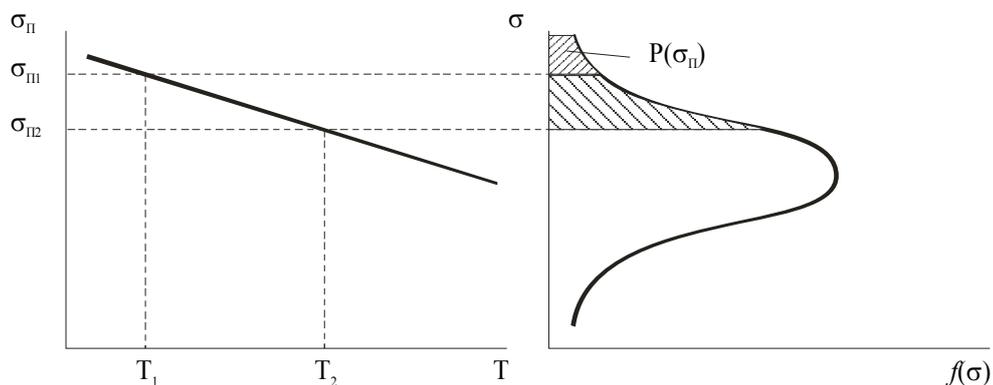


Рис. 3.35. Влияние температуры T на вероятность превышения предела ползучести $P(\sigma_{\text{п}})$

Вероятность возникновения явлений ползучести $P(\sigma_{п})$ при температуре T_1 :

$$P_1(\sigma_{п}) = \int_{\sigma_{п0}}^{\sigma_{п1}} f(\sigma) d\sigma = \int_{\sigma_{п0}}^{\sigma_{п1}} \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\sigma-\bar{\sigma})^2}{2S^2}} d\sigma = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{\sigma_{п0}}^{\sigma_{п1}} e^{-\frac{(\sigma-\bar{\sigma})^2}{2S^2}} d\sigma, \quad (3.95)$$

где S – среднеквадратическое отклонение напряжений сжатия; $\sigma_{п1}$ – предел ползучести при температуре T_1 .

При T_2 вероятность возникновения ползучести $P_1(\sigma_{п})$:

$$P_2(\sigma_{п}) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{\sigma_{п0}}^{\sigma_{п2}} e^{-\frac{(\sigma-\bar{\sigma})^2}{2S^2}} d\sigma, \quad (3.96)$$

где $\sigma_{п2}$ – предел ползучести при температуре T_2 (заштрихованная площадь на рис. 3.35 увеличивается).

В этих пределах характер зависимости остаточной деформации от температуры кумулятивный. Учитывая незначительный интервал изменения температуры ее можно аппроксимировать линейной зависимостью.

$$\delta = \delta_0 + b''T, \quad (3.97)$$

где b'' – коэффициент пропорциональности [16].

Это ведет к повышению вероятности изменения соосности подшипников вала ротора турбокомпрессора, касания крыльчаток о корпус улиток, появления дисбаланса и износа вала ротора, подтекания масла. Более 70% всех отказов турбокомпрессора, вызванных неблагоприятными условиями эксплуатации, связано с высокой теплонапряженностью его деталей (перегрев вала, закоксовывание деталей, коробление корпуса и т.д.) [16, 17].

Из вышеописанного следует, что форсирование повышает теплонапряженность деталей силового агрегата, ухудшает свойства масел, приводит к сокращению ресурса турбокомпрессора и всего двигателя в целом, это обуславливает необходимость поиска методов снижения высокой теплонапряженности элементов двигателя для повышения его долговечности.

3.5. Выводы

1. С ростом наработки вследствие повышения динамических нагрузок износ и овальность втулки верхней головки шатуна увеличивается по экспоненциальной зависимости (3.6) и (3.7) соответственно. Вследствие фреттинг-изнашивания в неподвижном сопряжении верхней головки шатуна интенсивность изнашивания рассматриваемого сопряжении уменьшается по экспоненциальной зависимости (3.11).

Деформация вкладышей обуславливает неравномерное изнашивание нижней головки шатуна и опор блока цилиндров по образующей

(корсетность), которая с ростом наработки увеличивается по экспоненциальной зависимости (3.12).

2. На основе характеристики работы подшипника и вероятности контактирования микронеровностей сопряженных деталей обоснован линейный характер интенсивности изнашивания от зазоров в подшипнике (3.39).

3. Действующие динамические нагрузки в коренной опоре блока цилиндров обуславливают фреттинг-изнашивание в неподвижных сопряжениях по экспоненциальной зависимости (3.52).

При увеличении динамических нагрузок, вследствие увеличения зазоров в сопряжении и достижения действующим напряжением предела текучести σ_T материала блока цилиндров, возникают условия начала пластического деформирования рабочих поверхностей опор, а при повышении температуры в трущемся сопряжении – появление ползучести материала.

Поля напряжений в коренной опоре блока цилиндров КамАЗ-740 отличаются значительной неравномерностью распределения, наибольшие напряжения находятся в нижней части бугеля по направлениям действия равнодействующих газовых сил и составляют 55-60 МПа, в верхней части опоры напряжения от действия инерционных сил составляют 37-45 МПа.

4. Остановка двигателя повышает рост температуры ТКР из-за отсутствия охлаждения его маслом, а в отдельных его элементах (подшипниковом узле) температура достигает до 260 °С, что значительно повышает скорость старения моторного масла.

5. Решение составленного дифференциального уравнения вращения вала ротора турбокомпрессора получено в виде экспоненциальной зависимости угловой скорости времени выбега (3.87) и линейного уравнения времени выбега от пробега автомобиля (3.92).

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Формирование металлопокрытий электролитического железа в условиях контролируемой разреженной атмосферы

4.1.1. Формирование структуры электролитического железа

Осаждение металла на катоде рассматривается как процесс, протекающий в две стадии: образование центров кристаллизации (зародышей) и рост образовавшихся центров кристаллизации [329].

Величина образовавшихся кристаллов определяется соотношением скоростей указанных стадий, а также средним временем образования кристалла, протекающим с момента образования зародыша до прекращения роста кристалла [68, 75, 329].

При электрокристаллизации величина кристаллов получается тем меньше, чем меньше концентрация, ниже температура и больше вязкость электролита – факторы, определяющие диффузию [63, 133]. Исследование явлений слоеобразования на гранях кристаллов при электроосаждении железа привело к ряду важных заключений [157, 195, 211]:

- микроскопически видимые слои периодически распространяются по грани, возникая чаще всего у одного и того же края грани;

- толщина слоев изменяется при изменении условий роста кристаллов от значений, составляющих малую долю микрона, до нескольких микрон (рис. 4.1);



Рис. 4.1. Трехмерные ступени (пакеты) роста твердого электролитического
железного покрытия

- скорость распространения слоя по грани также изменяется в соответствии с его толщиной;

- нередко на еще не законченном слое возникают новые слои, рост грани при этом осуществляется путем одновременного распространения нескольких слоев;

- с увеличением размеров грани толщина слоя, измеренная вдоль его граней, оказывается неодинаковой.

Эти заключения могут быть использованы при помощи представлений о различии в скоростях образования и роста кристаллов на основе явления пассивации. Объяснение локализации и периодичности возникновения «зародышей» толстых слоев заключается в концентрационных явлениях при движении электролита [196, 132]. Движение электролита в диффузном слое при процессе роста кристаллов играет фундаментальную роль, так как потребление ионов происходит локализованно – около фронта роста толстого слоя, периодически распространяющегося на грани кристаллов. Своеобразное потребление ионов в направлении, параллельном поверхности катода, вызывает возникновение тангенциального градиента концентрации. Этот градиент концентрации проявляется в непосредственной близости катода, к поверхности, т.е. в той области пограничного слоя, в которой при соответствующих условиях может возникнуть диффузный слой, характерный для рассмотренных явлений [196].

Принудительное движение электролита вдоль растущей грани кристалла вызывает направленное смещение фронта роста слоя электролитического железа в соответствии с направлением его движения [132, 141]. Такие направленные смещения могут быть использованы только с точки зрения улучшения питания «фронта роста» ионами металла, прибывающими туда вместе с механически смещенными слоями электролита.

При реальных процессах электрокристаллизации смещение, испытываемое «фронтом роста», в десятки и сотни раз меньше линейных размеров диффузионного пространства, из которого извлекаются ионы для последовательного построения новых участков толстого слоя. Обеднение раствора электролита у «фронта роста» должно приводить к возникновению направленного вверх потока удельной, более легкой жидкости, приводящего к возникновению тангенциально направленных конвекционных потоков, в результате которых диффузионный режим переноса ионов должен измениться [196].

Исследования по электроосаждению железа показали [212, 222], что формирование покрытий электролитического железа следует связывать с теми концентрационными изменениями при катодном слое, которые возникают в результате совместного выделения железа с водородом.

Водород, адсорбируясь на катодной поверхности, экранирует её (рис. 4.2) и приводит к повышению истинной плотности тока. Особенно это

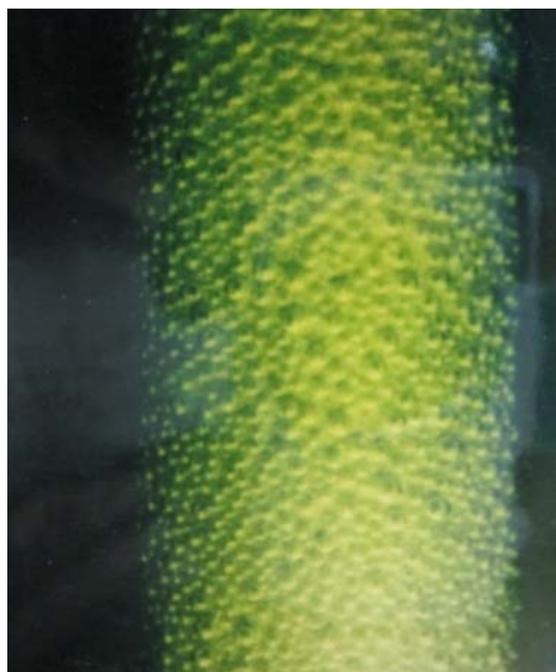


Рис. 4.2. Адсорбция пузырьков водорода на поверхности образца

обстоятельство сказывается при низких температурах электролита, так как отрыв пузырьков водорода от поверхности происходит после того, когда они достигнут значительных размеров.

Пузырьки водорода препятствуют тангенциальному подводу электролита, что приводит даже при небольших плотностях тока к образованию порошкообразных осадков.

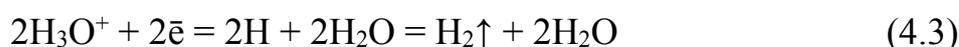
Особенностью при электроосаждении железа является то, что резкой границей, разделяющей области темных и светлых покрытий при высоких плотностях тока, служит температура электролита, равная 70...72°C, при которой визуально трудно наблюдать рост и отрыв пузырьков водорода от поверхности катода [56].

Важным обстоятельством, связанным с выделением водорода, является то, что часть атомов водорода остаются на поверхности катода в адсорбированном состоянии и происходит наводороживание металла. В результате включения водорода изменяются физико-механические свойства металла, что приводит к растрескиванию, а иногда и отслаиванию отдельных частей покрытия от основного металла.

Исследования, выполненные Ю.В. Баймаковым и Ю.Н. Петровым [241], показали, что ухудшение механических свойств электролитических осадков железа, главным образом, связано с включением в них молекулярного водорода, а атомарный водород, находясь в твердом растворе с α -железом, искажает кристаллическую решетку и тем самым улучшает механические свойства покрытий (прочность, твердость, износостойкость). Характерно, что количество атомарного водорода, находящегося в покрытии, незначительно меняется в зависимости от условий электролиза. Это происходит в результате ограниченного растворения водорода в α -железе [241].

При адсорбции водорода на металлах группы железа объемное и мольное соотношения адсорбированных атомов водорода к атомам металла составляют 1:24 и 1: 1000 соответственно [159]. Можно примерно оценить количество водорода, включенного в эти металлы. Если учесть, что осаждение железа происходит слоями толщиной 10 – 1000 атомов, то объем водорода, поглощенного одним 1 см³ железа, составит примерно 0,4 см³, при этом мольная доля водорода составит 0,1%. По данным профессора М.П. Мелкова [210], количество водорода, включающегося в электролитические осадки железа, колеблется от 0,5 до 2 см³/г. Исследования, выполненные Н.М. Савельевым [273], показали, что для осаждения железа из хлористых электролитов при катодной плотности тока 20А/дм² и выше лучше применять более высокую концентрацию соли железа (450-550 г/л), содержание кислоты в электролите поддерживать до 2-3 г/л, с увеличением кислотности электролита осадки железа становятся более мягкими и гибкими, удлинение при испытании на разрыв увеличивается, а сопротивление разрыву уменьшается.

Широкие исследования процесса железнения, выполненные профессором М.П. Мелковым и последователями его школы [59, 40, 23, 215, 216, 218, 240], показали, что возможно формировать процесс железнения при обеспечении требуемых физико-механических свойств покрытий железа, если в начальный период электроосаждения железа температура электролита будет не ниже 60°C, pH электролита не выше 2, а начальная катодная плотность тока не будет превышать 2...4 А/дм². При этих условиях электролиза покрытия железа имеют серебристо-белый цвет и обладают невысокой твердостью. Очевидно, на катоде протекают при этом преимущественно только такие процессы:



При ужесточении режимов электролиза возникают благоприятные условия для возможного разряда железа по такой схеме:



Восстановление водородного иона из кислого раствора происходит в две стадии. Первая стадия восстановления представляет собой разряд катионов. Образующийся при этом атом водорода, обладающий большой химической активностью, должен адсорбироваться поверхностью электрода, образуя гидрид состава FeH. Вторая стадия заключается в образовании молекул H₂ и адсорбированных атомов (рекомбинация). Молекулы водорода значительно менее склонны к адсорбции, чем атомы. Поэтому они покидают поверхность, частично переходя в раствор и преимущественно образуя пузырьки газа.

Рядом исследователей было предположено, что происходит так называемая «электрохимическая десорбция» [103, 157, 320, 326]. Этот путь удаления водорода заключается в том, что разряд очередного иона водорода происходит в точке, занятой адсорбированным атомом. При этом сразу образуется молекула, покидающая поверхность электрода:



В этой стадии совмещены разряд катиона и взаимодействие полученного атома с уже имеющимся на электроде атомом, находящимся в адсорбированном состоянии. Поэтому данный процесс в отдельных случаях имеет существенное значение. Исследования покрытий железа, полученных в проточном электролите, показали [50], что независимо от условий электролиза покрытия железа имеют ярко выраженную дендритную структуру.

Волокна вытянуты по одной из кристаллографических осей, расположенной перпендикулярно поверхности, покрываемой железом (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Структура покрытия электролитического железа, полученного в проточном электролите

При большом количестве одновременно растущих дендритов рост отдельного дендрита должен, несомненно, ограничиваться соседними дендритами, а поэтому благоприятным направлением роста и должна быть нормаль к поверхности реакции.

Другой характерной особенностью структуры покрытий железа, полученных при сравнительно более жестких режимах электролиза, является наличие трещин, которые, в свою очередь, также расположены по нормали к поверхности реакции. Такая ориентация волокон и трещин определяется, по всей вероятности, характером образования текстуры покрытия железа. Появление трещин в покрытиях железа (рис. 4.4) указывает на возникновение в них больших внутренних напряжений, превышающих предел прочности электролитического железа.



Рис. 4.4. Появление трещин в покрытиях железа

При повышении температуры электролита количество трещин в покрытиях железа уменьшается. В покрытиях железа обнаруживаются темные включения. Часть этих включений располагаются беспорядочно, и они имеют неопределенную округлую форму. Поэтому можно предполагать, что они представляют собой неметаллические включения, случайно внесенные в покрытия при электролизе. Другая часть включений уже имеют вполне определенную ориентацию: они располагаются вдоль волокон или игл (рис. 4.5).

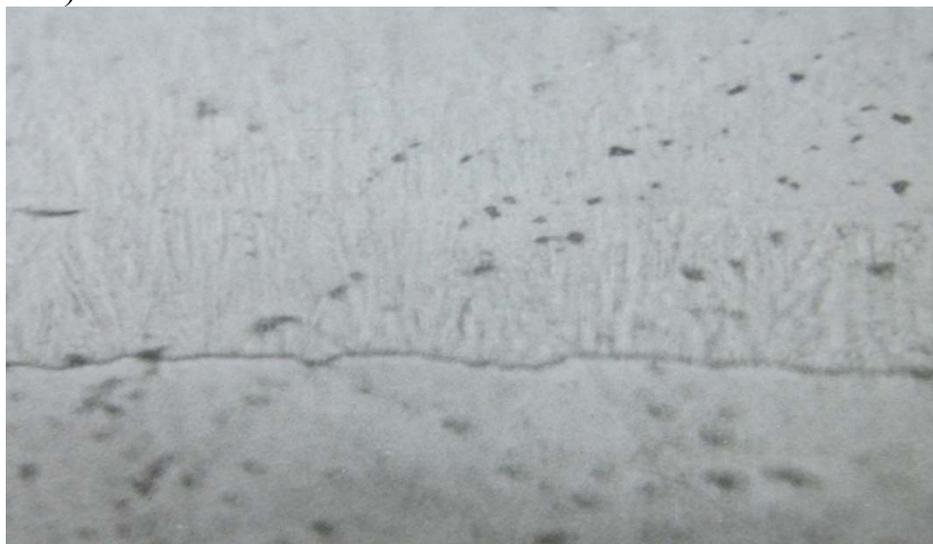


Рис. 4.5. Неметаллические включения, случайно внесенные в покрытия при электролизе

Присутствие этих включений наблюдается за счет концентрационных изменений, происходящих в прикатодном слое электролита, и взаимодействия поверхности растущего осадка с вторичными продуктами ($\text{FeOH}_{\text{адс}}$) электрохимической реакции, протекающей при электролизе железа.

Проведенные исследования [21, 56] показывают, что наиболее резко выраженные дендритообразная структура и слоистость покрытий железа образуются при более жестких режимах электролиза, то есть в том случае, когда имеется наибольшая вероятность выпадения в прикатодном слое основных солей железа и включения их в осадок.

4.1.2. Выбор условий для начального периода осаждения железа в условиях разреженной атмосферы

Перед нанесением электролитических покрытий железа на поверхности железоуглеродистых сплавов производится выдержка в кислых водных электролитах без тока в течение нескольких десятков секунд (20...60 с). Очевидно, на поверхности, соприкасающейся с электролитом, устанавливается сложное равновесие:



Газ водород находится в равновесии с атомами, адсорбированными на поверхности ($N_{адс}$), а последние – с ионами водорода в растворе. Ввиду малой скорости второй стадии равновесие легко нарушается, так как при изменении условий оно не может быстро установиться. Наоборот, равновесие первой стадии постоянно сохраняется, так как быстрое протекание процесса $H^+ = N_{адс}$ обеспечивает установление равновесия при изменении условий.

По истечении нескольких секунд на осаждаемой поверхности возникает стационарное равновесие, при котором слой металла начинает растворяться. Предполагается, что его растворение и восстановление водорода могут происходить на любых точках поверхности. Поверхность детали играет в этом случае роль пространственно совмещенных катодов и анодов [30]. В этом случае на катоде происходит восстановление водорода $H_2 = N_{адс}$. Поверхностная концентрация адсорбированных атомов возрастает и принимает значения $(N_{адс})_2$. Величина $(N_{адс})_2$ зависит от поляризации, т.е. от скорости катодного процесса. Увеличение $(N_{адс})_2$ должно нарушить равновесие и вызвать химическую рекомбинацию $2N_{адс} = H_2 \uparrow$. Скорость ее может быть описана уравнением бимолекулярной реакции:

$$I_k = K(N_{адс})_2, \quad (4.9)$$

где I_k – скорость, выраженная через плотность тока.

Металлический электрод находится в равновесии с раствором катионов водорода только при определенном потенциале, зависящем от концентрации катионов водорода и парциального давления газа водорода над раствором. Отклонения потенциала от стационарного значения в отрицательную сторону, нарушая равенство $\varphi_k = \varphi_a = \varphi_{равн}$, приводят к неравенству $\varphi_k > \varphi_{равн}$. Это означает, что в таком случае будет происходить постоянное восстановление катионов водорода $2H^+ + 2e = H_2$. Отклонение же потенциала в сторону положительных значений вызовет постоянное окисление водорода $H_2 = 2H^+ + 2e$. Выражение для потенциала водородного электрода в зависимости от $[H_2]$ и $[H^+]$ имеет вид:

$$\varphi = 0,059 \lg \frac{[H^+]}{P_{H_2}^{1/2}}, \quad (4.10)$$

где $P_{H_2}^{1/2}$ – парциальное давление водорода.

Уменьшение активности ионов водорода делает потенциал более отрицательным. Также влияет увеличение парциального давления газа водорода. Учтя, что $-\lg[H^+] = pH$, уравнение (4.10), то при $P_{H_2} = 1$ атм. это уравнение можно представить в виде:

$$\varphi = -0,059 pH. \quad (4.11)$$

Из выражения (4.11) следует, что потенциал водородного электрода представляет собой линейную функцию от pH. При этом парциальное

давление водорода, проходящего пузырьками сквозь раствор, должно быть равным 0,1 МПа.

Связь между равновесным потенциалом и парциальным давлением H_2 (при неизменной активности ионов H^+) показывает, что если будет изменяться потенциал водородного электрода, то будет изменяться в известных пределах и парциальное давление газа. Сообщая электроду возрастающий в отрицательную сторону потенциал, тем самым вызывается увеличение P . Если раствор находится под атмосферным давлением, то до тех пор, пока $P_{H_2} < 0,1$ МПа, газ не сможет образовать пузырьки, – атмосферное давление будет этому препятствовать. Дальнейший сдвиг потенциала в отрицательную сторону уже не может вызвать нарастание давления, так как газ удаляется с поверхности электрода в виде пузырьков. При практическом отсутствии газа водорода в растворе самая малая катодная поляризация вызовет восстановление водородных ионов. Но образовавшийся вследствие этого газ водород не сможет собраться в пузырек, а останется на поверхности электрода в адсорбированном состоянии. Если бы ничто не препятствовало нарастанию концентрации адсорбированного водорода, которая соответствует равновесному потенциалу, то в дальнейшем электродный процесс прекратился бы. Водород, адсорбированный электродом, не будет находиться в равновесии с раствором, так как в растворе газа водорода практически нет. Поэтому вместе с восстановлением и адсорбцией водорода должна происходить десорбция водорода.

Десорбция и растворение газа обеспечивают на поверхности электрода давление водорода, несколько более низкое, чем равновесное, отвечающее данной поляризации. Если увеличить поляризацию, то давление газа возрастет и установится новое значение потенциала, тоже лишь немного отличающееся от равновесного. При более высоком давлении водорода десорбция и диффузия газа в раствор происходят несколько быстрее, что и обуславливает некоторый рост плотности тока.

Таким образом, увеличение поляризации до тех пор, пока давление водорода не станет равным 0,1 МПа, заставляет поверхность проходить ряд состояний, весьма близких к равновесному, почему процесс и не может протекать с большей скоростью. Но когда достигнут такой потенциал, который при данной величине pH отвечает давлению водорода в 0,1 МПа, дальнейшая возможность роста P_{H_2} прекращается. Теперь водород может образовывать пузырьки газа и в этом виде покидать поверхность. Вследствие этого дальнейшее увеличение поляризации катода приводит к большему отключению потенциала от равновесного и обуславливает значительный рост плотности тока.

Рассматривая поляризационную диаграмму самопроизвольного окисления металла, представленную на рис. 4.6, можно видеть, что скорость окисления металла, выраженная в плотностях тока (i_a), должна зависеть от

разности потенциалов ($\Delta\phi$) между равновесным потенциалом водорода (ϕ_{H_2}) и потенциалом окисляемого металла ($\phi_{\text{равн}}^{\text{Me}}$).

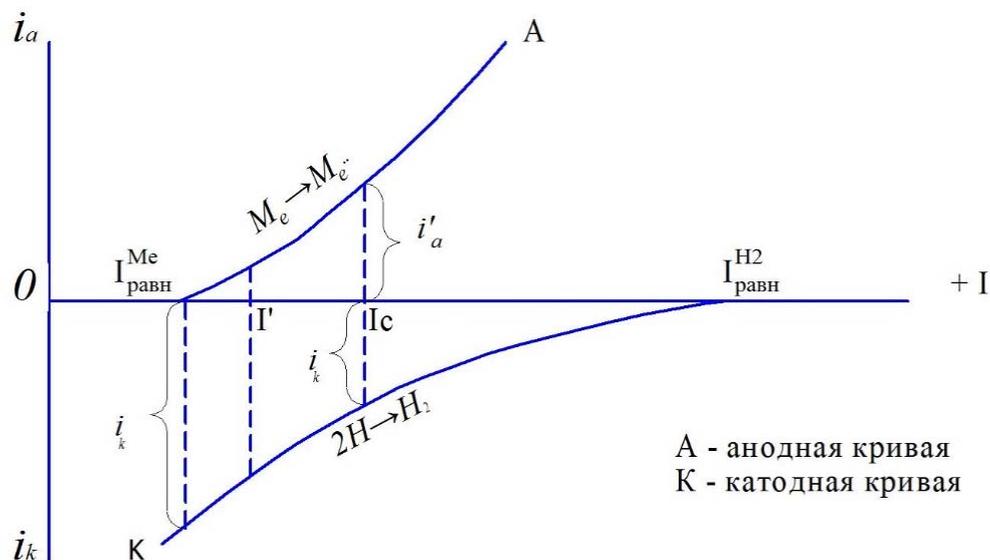


Рис. 4.6. Поляризационная диаграмма окисления металла

Невозможность совместить на одной поверхности два равновесия, требующих два различных потенциала, приводит к установлению стационарного компромиссного потенциала (ϕ_c), обуславливающего протекание окисления металла и сопряженного с ним восстановления окислителя (H^+). При этом на анодных участках поверхности образуются покрытия из соли металла или основания ($\text{Me}(\text{OH})_2$). Таким образом, можно считать, что выдержка без тока железоуглеродистых сплавов в кислом электролите при железнении должна быть исключена из технологического процесса с точки зрения обеспечения прочности сцепления их с электролитическим железом, так как наличие на поверхности сплава соли или основания уменьшает молекулярные взаимодействия между ними.

Очевидно, в первоначальный момент необходимо железоуглеродистые сплавы подвергнуть сразу катодной поляризации при значении потенциала, несколько меньшем $\phi_{\text{равн}}^{\text{Fe}}$. При этом на поверхности сплава должен происходить только катодный процесс восстановления водорода.

Осаждение электролитического железа осуществляется на тонкий окисный слой, который всегда остаётся после обработки в 30%-м растворе серной кислоты и промывки в холодной воде.

Атомарный водород является энергичным восстановителем окисных соединений железа. Поэтому в первоначальный момент при осаждении железа необходимо создать благоприятные условия для обильного выделения водорода. Это достигается обычно за счет или уменьшения рН электролита, или увеличения катодной плотности тока и температуры электролита.

Значения величины рН электролита железнения могут изменяться в сравнительно узких пределах из-за наступления гидролиза солей железа или резкого падения значений выхода железа по току даже при высоких плотностях тока. Выпадение осадка гидроокиси железа ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) начинается при $\text{pH}=2,2\dots2,7$, а гидрозакиси железа ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) – при $\text{pH}=6,2\dots6,5$. Заметное падение выхода железа по току начинается при $\text{pH}=1$, если электролиз железа проводится даже при плотностях тока $20\dots30$ А/дм.

Учитывая, что с увеличением плотности тока происходит защелачивание прикатодного слоя электролита, среднее значение величины рН электролита необходимо поддерживать в пределах от 1,5 до 1,8.

При погружении образца из железоуглеродистого сплава в электролит железнения необходимо установить такое значение катодной плотности тока, чтобы он не растворялся, а происходил процесс выделения водорода на его поверхности, это возможно осуществить, если на поверхности создать потенциал $\varphi_{\text{равн}}$, т.е. при $i_a = i_k = 0$ (рис. 4.6).

В кислом электролите железнения процесс саморастворения железа будет протекать преимущественно с водородной деполяризацией. Сложный процесс растворения железа может быть поставлен в прямую зависимость от двух основных, более доступных для наблюдения и изучения факторов: кинетики анодного и кинетики катодного процессов.

С точки зрения электрохимического механизма, весь материальный эффект растворения металла является результатом анодного процесса сложной многоэлектродной системы, т.е. количество растворившегося металла пропорционально величине тока растворения [277]:

$$Q = K \times I_{\text{ж}}, \quad (4.12)$$

где $K = \frac{\tau A}{Fn}$, τ – время растворения, с; A – атомный вес металла, г; F – число Фарадея; n – валентность; $I_{\text{ж}}$ – ток растворения.

Следовательно, вопрос возможности аналитического расчета скорости растворения металла сводится к возможному расчету тока растворения. Так как реальный сплав металла представляет собой систему короткозамкнутых электродов, то определение величины скорости растворения является практически неразрешимой задачей. Поэтому скорость растворения сплава характеризуется обычно весовым показателем процесса растворения, который для каждого конкретного случая имеет вполне определенные значения.

Весовой показатель процесса растворения – изменение веса металла в результате растворения, отнесенное к единице поверхности металла. Или

$$K'_{\text{вс}} = \frac{q_0 - q_1}{S\tau}, \quad (4.13)$$

где q_0 – начальный вес металла, г; q_1 – вес металла после растворения и удаления продуктов травления, г; S – поверхность металла, см^2 ; τ – время процесса растворения, ч.

Тогда, очевидно, между токовым и весовым показателями процесса растворения сплава существует такая связь:

$$I_{\text{ж}} = \frac{D_{\text{к}} K'_{\text{век}}}{C_{\text{к}}}, \quad (4.14)$$

где $D_{\text{к}}$ – катодная плотность тока, А/дм; $C_{\text{к}}$ – электрохимический эквивалент железа, г/А.ч.

На основании уравнения (4.14) и располагая экспериментальными значениями весовых показателей растворения железоуглеродистых сплавов, зависящих от температуры и рН электролита, можно определить значение катодной плотности, при котором на поверхности будет происходить только один процесс выделения водорода.

При прохождении тока через электролит с течением времени происходит обеднение ионов водорода вблизи катодной поверхности и соответствующий рост потенциала. При обращении в нуль концентрации ионов водорода потенциал поверхности неограниченно растет, и становится возможным разряд ионов железа. Из теории конвективной диффузии вытекает, что время, в течение которого концентрация разряжающихся ионов у катодной поверхности обращается в нуль, оказывается увеличенным из-за конвекции [196]. Скорость движения электролита вдоль катодной поверхности приближается к значению скорости подъема пузырьков водорода. Скорость движения газовых пузырьков диаметром 0,2...1,5 мм почти не зависит от диаметра и равна примерно 28 – 30 см/с [196].

В настоящее время не имеется количественных значений времени наступления предельного тока ионов водорода. Эти данные могут быть получены путем снятия катодных поляризационных кривых, при значениях плотности тока, определенных по уравнению (4.14). Проведенные исследования [21-24] показали, что, создавая разреженное пространство над электролитом, нагретым до 55°C, возможно обеспечить получение покрытий железа, имеющих идентичные показатели по твердости, микроструктуре и прочности сцепления с железоуглеродистыми сплавами с покрытиями, полученными в электролите, нагретом до 80° С при обычном давлении (750...760 мм рт. ст.).

Требуемая степень разреженности пространства над электролитом может устанавливаться в зависимости от значений насыщенного пара воды и при температуре электролита, равной 55°C, должна составлять 75...85%.

Согласно уравнению (4.10), при увеличении степени разреженности пространства над электролитом значение потенциала разряда ионов водорода должно сдвигаться в положительную сторону, а значение потенциала разряда ионов железа – оставаться неизменным.

Отсюда вытекает возможность произвольного регулирования соотношения между долями совместно выделяющегося водорода и железа в пределах от 0 до 0,9, что является особенно важным при выборе условий формирования первоначальных слоев железа на поверхности железоуглеродистых сплавов.

4.2. Исследование электрохимического состояния осаждаемой поверхности детали при начальной катодной поляризации в условиях разреженной атмосферы

На рис. 4.8 представлены катодные поляризационные кривые начального периода осаждения. Анализ полученных кривых показывает, что повышение температуры значительно снижает (~ на 200 – 300 мВ) перенапряжение выделения водорода, что вполне согласуется с общепринятыми представлениями [62, 159, 320, 326]. Одной из причин снижения перенапряжения выделения водорода при повышении температуры является уменьшение адсорбции на катоде поверхностно-активных веществ, в том числе и выделяющегося водорода. Это важно для практических целей: значительно улучшается качество электролитического покрытия, как на уровне микроструктуры (уменьшение слоистости, микротрещин), так и за счет снижения питтинга на поверхности. Таким образом, технологические приемы, ведущие к увеличению десорбции водорода с поверхности катода, должны способствовать повышению качества покрытия, что, собственно, и подтверждают исследования осаждения электролитического железа в разреженной атмосфере.

Как видно (рис. 4.7, 4.8, 4.9), влияние разрежения на величину перенапряжения выделения водорода более значительно, чем влияние температуры. При 20 °С величина снижения перенапряжения составляет 250...300 мВ, при 55 °С эта величина уже достигает 300...400 мВ и соответствует приблизительно перенапряжению при температуре 80 °С (см. рис. 4.7, кривые 2, 3).

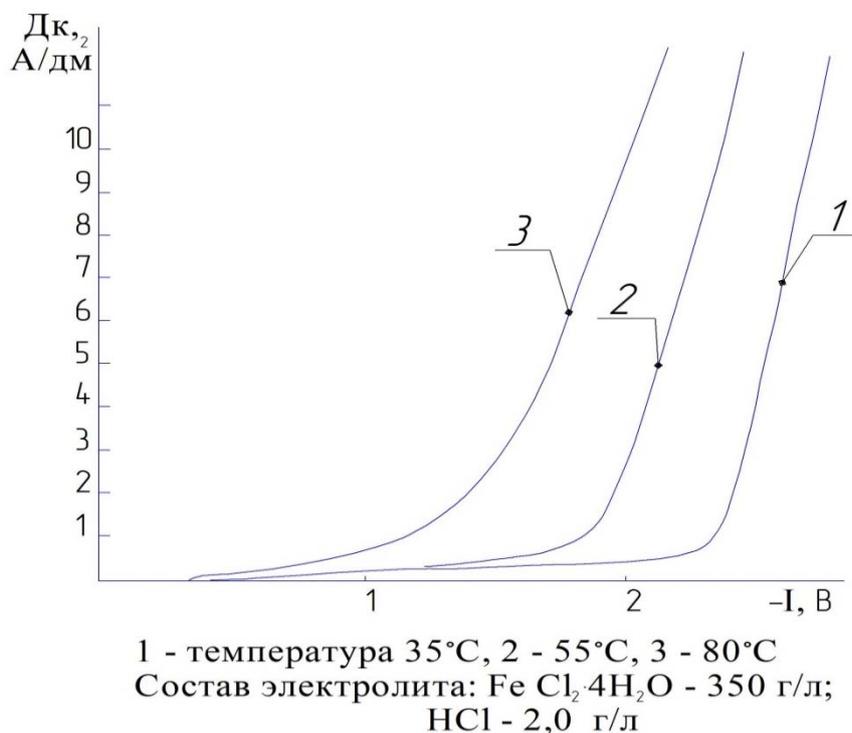


Рис. 4.7. Поляризационные кривые восстановления водорода из хлористого электролита железения

Исходя из последнего, можно предположить, что уменьшение давления над электролитом позволит при температуре 50...55 °С формировать покрытия, по свойствам аналогичные покрытиям, полученным при температуре 80 °С при нормальных условиях.

Значительное влияние на снижение перенапряжения выделения водорода в разреженной среде объясняется, вероятно, следующим. Снижение давления над поверхностью электролита вызывает снижение парциального давления водорода, в результате чего значительно облегчается десорбция водорода с поверхности катода. В этих условиях, естественно, облегчается и скорость разряда ионов водорода на поверхности катода, т. к. значительно снижается энергия активации проникновения их через адсорбционный слой. Вероятно, диффузионные ограничения в данном случае менее влияют на ход поляризационной кривой.

Значительное снижение перенапряжения водорода должно вызвать, в соответствии с существующими представлениями [159], увеличение выхода по току водорода, особенно при малых плотностях тока в начальный период осаждения. Это подтверждается проведенными исследованиями [56]: на образцах, используемых для снятия поляризационных кривых, при используемых плотностях тока от 0,5 до 6 А/дм² в разреженной атмосфере осадка электролитического железа визуально не обнаружено, в отличие от образцов, полученных при нормальных условиях и аналогичных режимах поляризации.

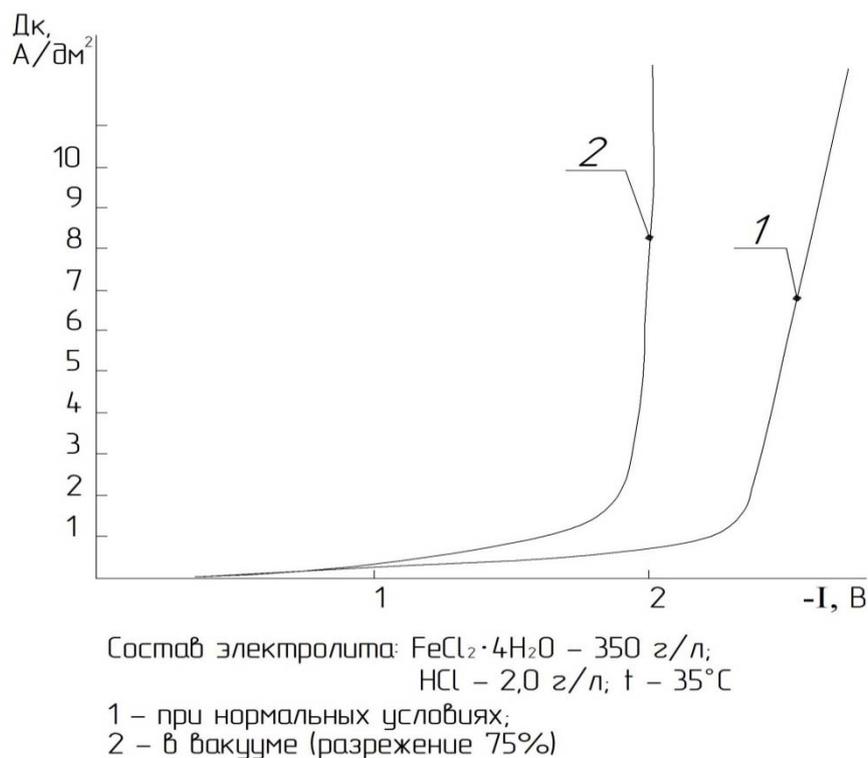
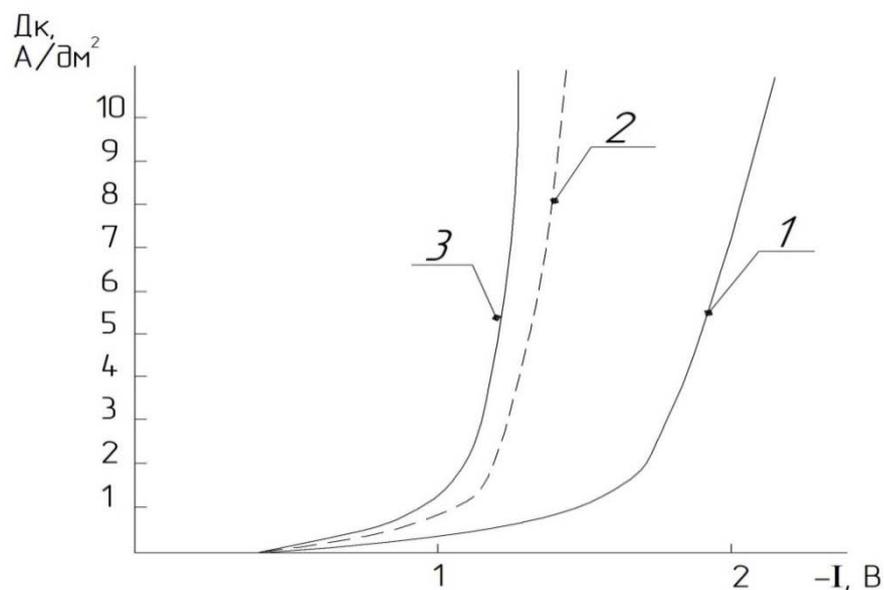


Рис. 4.8. Влияние разреженной среды на поляризационные кривые восстановления водорода из хлористого электролита железнения



Состав электролита: $\text{FeCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 350 \text{ г/л};$
 $\text{HCl} - 2,0 \text{ г/л}$

1 – $t^\circ 55^\circ\text{C}$, 2 – $t^\circ 80^\circ\text{C}$ – при нормальных условиях;
 3 – $t^\circ 55^\circ\text{C}$ (разрежение 75%)

Рис. 4.9. Влияние разреженной среды на поляризационные кривые восстановления водорода из хлористого электролита железнения

4.3. Исследование структурных преобразований в электролитическом железе

В типовом технологическом процессе предусматривается начало осаждения железа на поверхность детали тогда, когда она будет предварительно нагрета до температуры основной массы электролита путем выдержки ее без тока. Исследования структуры железных покрытий, выполненные профессором А.В. Митряковым, показали, что в начальных слоях железа толщиной от 8 до 1500 нм наблюдается повышенное содержание гидроокисных соединений железа, оксидов железа, карбидных карбонильных соединений железа, углерода и кислорода. Экспериментально показана возможность дополнительного включения гидроокиси в слои за счет защелачивания прикатодного слоя в момент включения катодного тока (рис. 4.10) из-за обеднения его ионами водорода, обусловленного нестационарной диффузией, а также коррозионными процессами, протекающими на поверхности стали при выдержке ее без тока в электролите железнения.

Создание разреженной атмосферы над уровнем электролита позволяет, как показано ранее, существенно изменить условия для формирования железного покрытия путем формирования процесса выделения водорода.

В данном исследовании решается первая задача о возможности подавления коррозионных процессов на поверхности путем катодной поляризации ее небольшим током, при котором выход водорода по току составляет около 100 %. В этот период времени атомарный водород будет способствовать восстановлению окисных пленок, которые образовались на поверхности образца при анодном травлении в 30%-ном растворе серной кислоты с последующей промывкой в проточной воде для удаления с него продуктов травления, образующихся при других операциях. Молекулярный водород, выделяющийся в виде конвективной диффузии [217], способствует увеличению времени установления стационарного режима протекания электроосаждения и интенсивному нагреву поверхности.



Рис. 4.10. Включения гидроокиси в слои за счет защелачивания прикатодного слоя

Решение второй задачи заключается в установлении максимальных значений начальной катодной плотности тока, когда в покрытиях железа еще не наблюдается образования трещин и заметного включения гидроокисных соединений.

При повышении катодной плотности тока выход железа по току возрастает (рис. 4.11).

Однако относительная доля процессов разряда ионов железа в диапазоне значений плотности тока от 2 до 6 А/дм² не превышает 17,2 %. Довольно резкое увеличение выхода железа по току начинает наблюдаться при значениях плотности тока с 8 до 10 А/ дм². Такой характер изменения выхода железа по току связан с процессом разряда ионов водорода.

Общеизвестно, что перенапряжение выделения водорода на металлах группы железа невелико, поэтому в первую очередь на поверхности разряжаются ионы водорода, имеющие более положительный потенциал для своего разряда. Ввиду того, что железо проявляет большую склонность к адсорбции атомарного водорода, поверхность катода частично экранируется, энергия активации для разряда ионов водорода уменьшается, а энергия активации ионов железа увеличивается. При значениях плотности тока $8 \dots 10 \text{ А/дм}^2$ в прикатодном слое электролита устанавливается стационарное состояние, соответствующее наступлению предельного тока водорода. Дальнейшее повышение катодной плотности тока будет приводить к защелачиванию прикатодного слоя электролита и к образованию гидроксидных соединений железа, которые, включаясь в осадок, увеличивают дисперсность его структуры. Из рис. 4.12 следует, что микротвердость железа увеличивается с повышением катодной плотности тока. Более интенсивное повышение твердости железа наблюдается при плотности тока более 8 А/дм^2 .

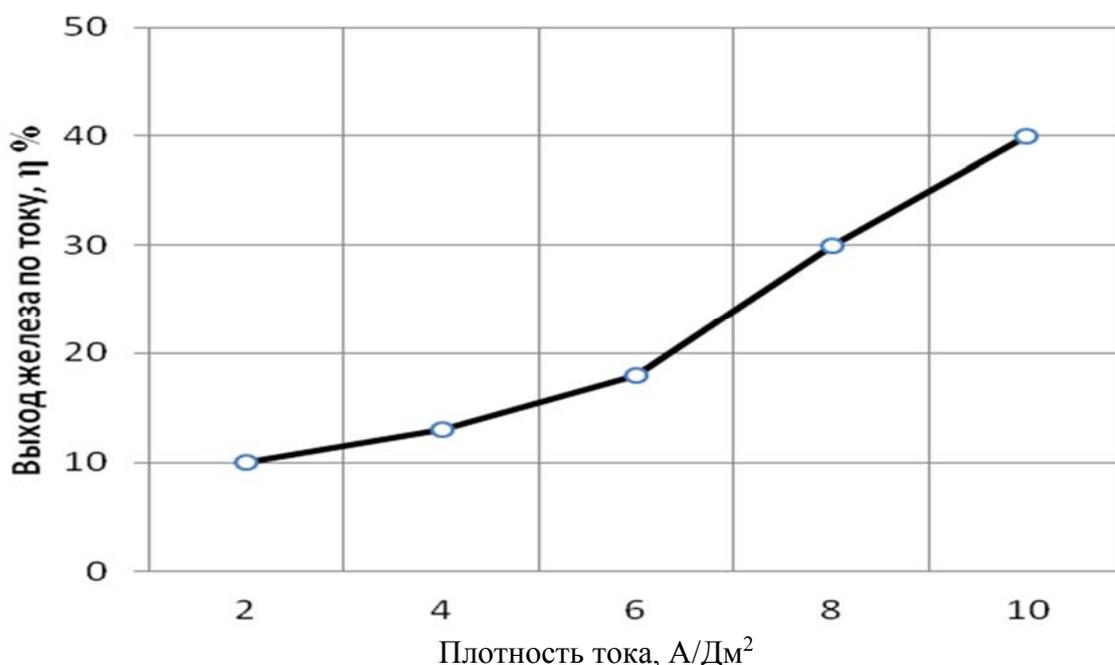


Рис. 4. 11. Изменение выхода железа по току в зависимости от катодной плотности тока

На фотографиях микроструктуры электролитического железа наблюдается столбчатая дендритообразная структура (рис. 4.13), при плотностях тока $8 \dots 10 \text{ А/дм}^2$ железо имеет характерную волокнистую структуру с волокнами, расположенными перпендикулярно поверхности покрытия.

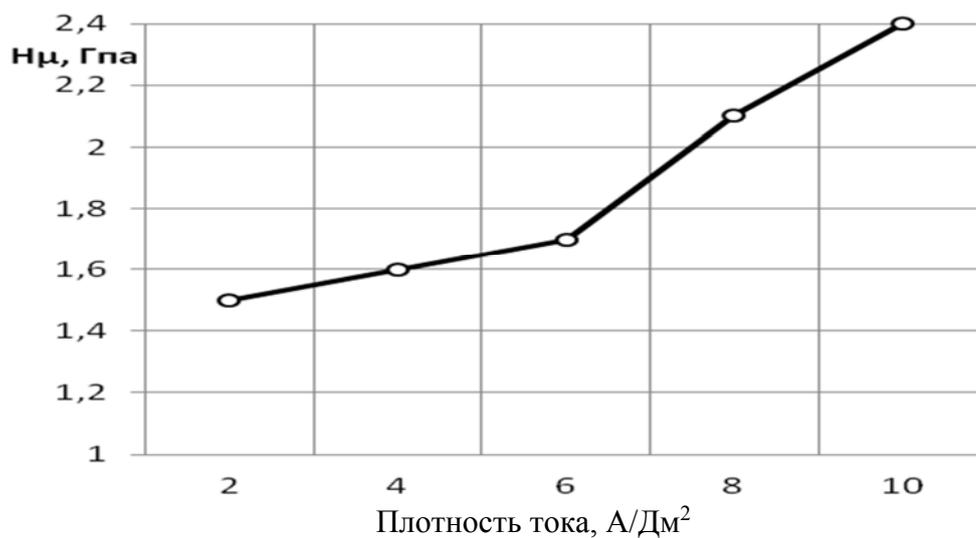


Рис. 4. 12. Изменение микротвердости железа в зависимости от катодной плотности тока



Рис. 4.13. Микроструктуры электролитического железа, полученного при плотностях тока 8...10 А / дм²

При плотности более 10 А/дм² в железе наблюдаются трещины (рис. 4.14).



Рис. 4.14. Трещины в покрытии электролитического железа

Из результатов исследований вытекает, что формирование первоначальных слоев электролитического железа на железоуглеродистых сплавах в условиях разреженной атмосферы при температуре электролита, равной 55 °С, следует проводить при значениях катодной плотности тока в интервале 6...8 А/дм².

4.4. Исследование адгезионной связи покрытий железа с восстанавливаемой поверхностью детали

При анодной обработке поверхности восстанавливаемой детали в 30%-м растворе серной кислоты не удаляются с его поверхности фазовые окислы компонентов, что сказывается на адгезионных свойствах покрытия с основой [30]. Данная задача решается при двойной анодной обработке поверхности сплава, заключительная анодная обработка выполняется в течение нескольких секунд в 30%-м растворе серной кислоты. Очевидно, и в этом случае на поверхности сплава должны образоваться вновь фазовые окислы его компонентов, которые желательно удалить с нее перед формированием первоначального слоя железа. Предварительное установление фазовых окислов компонентов сплава атомарным водородом, когда на поверхности не установится потенциал для разряда ионов железа, будет способствовать усилению адгезионной связи первоначального слоя железа на поверхности.

Исследования адгезионной связи покрытий электролитического железа с поверхностью восстанавливаемых деталей показали удовлетворительные результаты по прочности их сцепления [22, 56]. В связи с развиваемой концепцией надежности полученных результатов по прочности сцепления покрытий железа с поверхностями реальных деталей, размеры которых во много раз превышают лабораторные образцы, возникает необходимость расширения диапазона значений начальной плотности тока.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 4.1, показывают, что напряжения сдвига покрытий железа с поверхности образца зависят от значений начальной плотности тока и изменяются от 20,77 до 66 МПа. Наименьшие значения напряжения сдвига слоя железа с образца соответствует значениям плотности тока 2...4 А/дм².

При таких значениях плотности тока выход железа по току не превышает 12,5 % (рис. 4.11). Очевидно, при этом создаются благоприятные условия для увеличения скорости роста кристаллов железа, но не для увеличения скорости зарождения центров кристаллизации, в которых и образуются именно адгезионные связи между электролитическим железом и поверхностью сплава. С увеличением плотности тока катодная поляризация и выход железа по току также увеличиваются. В этих случаях создаются благоприятные условия для увеличения скорости зарождения центров

кристаллизации и усиления адгезионных связей между электролитическим железом и основой.

Т а б л и ц а 4.1

Результаты испытаний прочности сцепления
электролитического железа с образцом

№ п/п	Катодная плотность тока, А/дм ²	Температура электролита, °С	Степень разреженности в ячейке, %	Напряжение сдвига (среза) покрытия с образца, МПа
1	2	55	70 – 75	20,7
2	-	-	-	23,2
3	-	-	-	21,4
4	-	-	-	25,0
5	-	-	-	23,0
6	-	-	-	25,1
7	6	-	-	61,3
8	-	-	-	65,4
9	-	-	-	61,4
10	8	-	-	66,0
11	-	-	-	61,2
12	-	-	-	64,3
13	10	-	-	58,8
14	-	-	-	50,1
15	-	-	-	56,1

В диапазоне значений плотности тока от 5 до 8 А/дм² значения напряжений сдвига покрытий железа остаются практически неизменными, равными 61...65 МПа.

Покрyтия железа сдвигаются с поверхности образца в виде сплошного кольца. Покрyтия железа, полученные при значении плотности тока 10А/дм², сдвигаются при более низких значениях напряжения сдвига.

Такие покрyтия формируются, когда наступает предельный ток по водороду и создаются благоприятные условия для защелачивания прикатодного слоя электролита и образования гидрокислов железа, препятствующих адгезии железа с основой.

Таким образом, можно считать установленным, что оптимальные значения начальной плотности тока находятся в пределах от 5 до 8 А/дм² при осаждении железа в электролите, нагретом до 55°С, и в условиях разреженной атмосферы.

Возможность расширения диапазона значений начальной плотности тока имеет всегда большое практическое значение для обеспечения надежного сцепления гальванического покрытия с поверхностями крупногабаритных деталей [29, 33, 227, 35].

4.5. Влияние элементов режима железнения на точность формообразуемых заготовок, при восстановлении изношенных деталей

В ранее проведенных исследованиях [21, 22, 23, 24, 25, 26, 72] было показано, что на равномерность распределения силовых линий и металла по формируемой поверхности в значительной степени оказывают влияние условия процесса электролиза и его режимы.

В результате исследований влияния условий электролиза на точность размеров и формы заготовок [23, 24, 56] получен ряд математических моделей, адекватно описывающих область исследованного факторного пространства и обеспечивающих достаточную точность приближения расчетных данных к экспериментальным точкам, т.е. соблюдалось условие, при котором $F_{рас} < F_{табл}$.

Уравнения, показывающие зависимость исследуемых функций от частых параметров электролиза, имеют следующий вид:

для пояса 1

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & 41,094 - 0,103T - 1,229D_k - 34,712\tau - 0,005TD_k + 0,148D_k\tau + \\ & + 0,002T^2 + 0,273D_k^2 + 12,4963\tau^2; \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$F_{рас} = 0,857 < F_{табл} = 3,630,$$

для пояса 2

$$\begin{aligned} \sigma_2 = & 23,417 + 0,144T - 0,646 D_k - 23,966\tau - 0,002 TD_k - 0,048 D_k\tau - \\ & - 0,001T^2 + 0,014 D_k^2 + 8,279\tau^2; \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$F_{рас} = 1,785 < F_{табл} = 4,490,$$

для пояса 3

$$\begin{aligned} \sigma_3 = & 190,66 - 3,757T - 1,915 D_k - 48,323\tau + 0,004 TD_k + 0,086 D_k\tau + \\ & + 0,025T^2 + 0,028 D_k^2 + 18,358\tau^2; \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$F_{рас} = 1,739 < F_{табл} = 2,740,$$

отклонение профиля продольного сечения

$$\begin{aligned} \rho_1 = & 88,829 + 2,021T + 1,798 D_k + 65,908\tau + 0,004 TD_k + 0,153 D_k\tau + \\ & + 0,016T^2 - 0,052 D_k^2 - 23,731\tau^2; \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$F_{рас} = 2,171 < F_{табл} = 3,630.$$

Согласно полученным математическим моделям, среднеквадратическое отклонение диаметра заготовки, как мера его рассеивания, определяющая точность для всех трех поясов замера, зависит от всех трех исследуемых режимов электролиза: температуры электролита (Т), катодной плотности тока (D_k) и продолжительности электролиза (τ), увеличиваясь по совокупному влиянию элементов линейной и нелинейной частей полинома при их увеличении. Зависимость их неоднозначна и резко возрастает в ряду названных элементов режима электролиза для первого и третьего поясов замера. Критическим по длине заготовки местом, определяющим величину

припуска на обработку резанием, является третий пояс замеров. Для него в наибольшей степени проявляется установленное совокупное действие элементов режима электролиза на исследуемый параметр (σ). Поверхность отклика в исследуемом факторном пространстве режима (D_k) и (τ) и температуры электролита (T), равной 70°C , для первого, второго и третьего поясов замера представлена на рис. 4.15, 4.17, 4.19 соответственно. На рис. 4.16, 4.18, 4.20 показаны линии равного уровня значений среднеквадратического отклонения (σ) диаметра заготовки для поясов 1, 2, 3 соответственно, в зависимости от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k) при фиксированном значении температуры электролиза (T), равном 70°C . Отсюда следует, что области значений исследуемых элементов режима электролиза, обеспечивающие наименьшее значение среднеквадратического отклонения диаметра заготовки, для пояса 3, наихудшего, равны для плотности тока $20\text{--}30\text{ А/дм}^2$ и продолжительности электролиза $1,25\text{--}1,45$ часа. Отклонение профиля продольного сечения заготовки (ρ_1) определяется соотношением значений диаметров ее по поясам замеров 2 и 3. Его величина тоже зависит от всех трех элементов режима электролиза с существенно доминирующим влиянием продолжительности электролиза. Результаты исследований в частных значениях коррелируют с результатами, полученными ранее в работе [24].

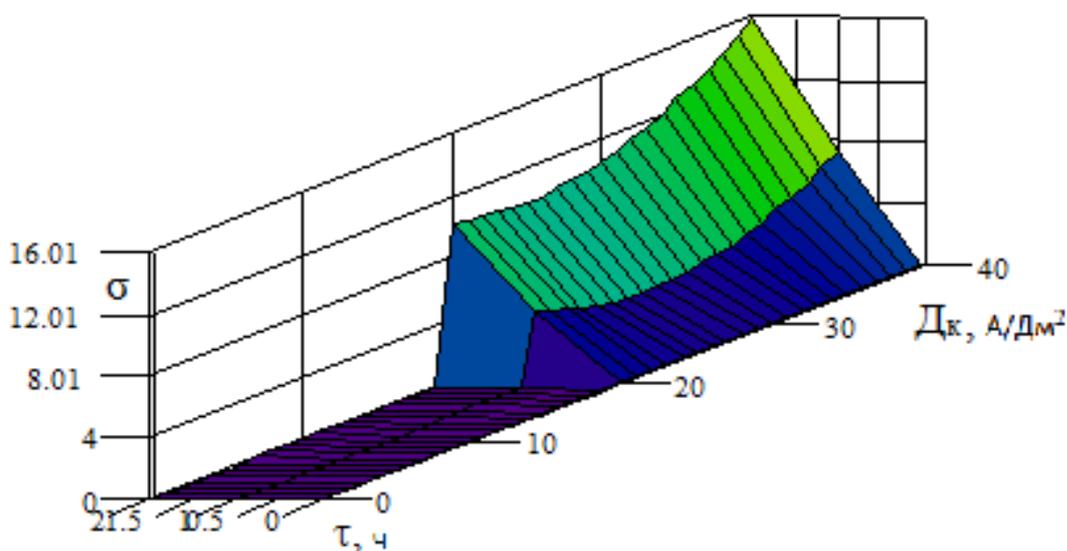


Рис. 4.15. Поверхность отклика в исследуемом факторном пространстве в зависимости среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k), при фиксированном значении температуры электролита $T=70^\circ\text{C}$

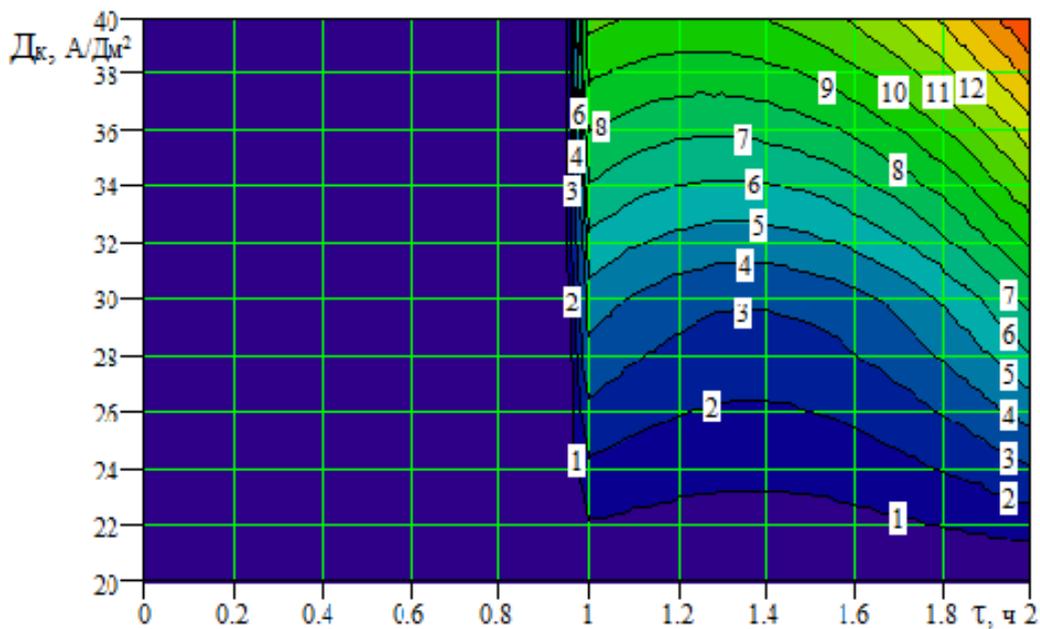


Рис. 4.16. Линии равного уровня значений среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k) при фиксированном значении температуры электролита $T=70^\circ C$

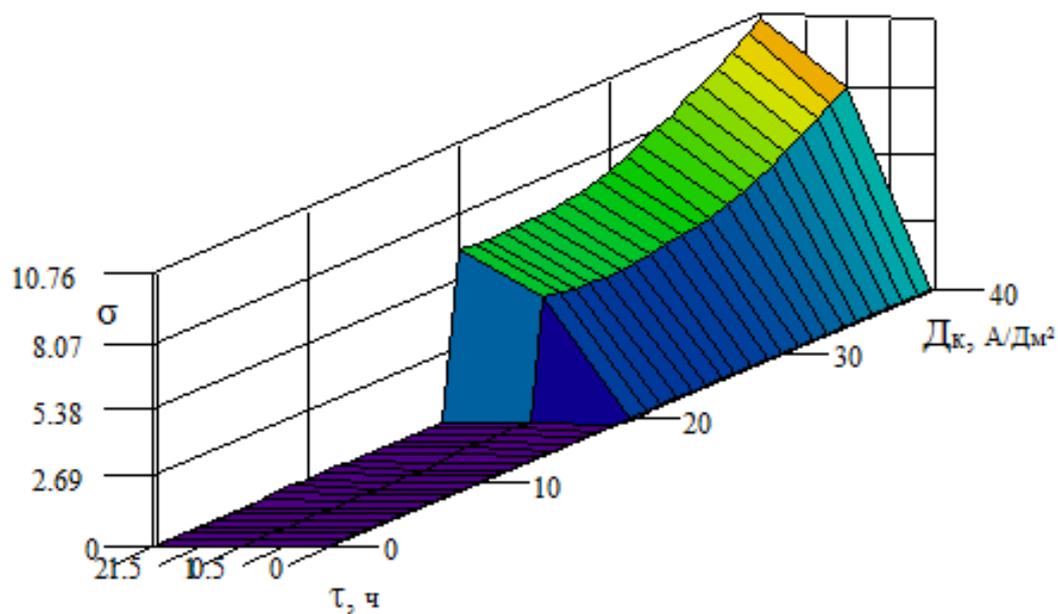


Рис. 4.17. Поверхность отклика в исследуемом факторном пространстве в зависимости среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k), при фиксированном значении температуры электролита $T=70^\circ C$

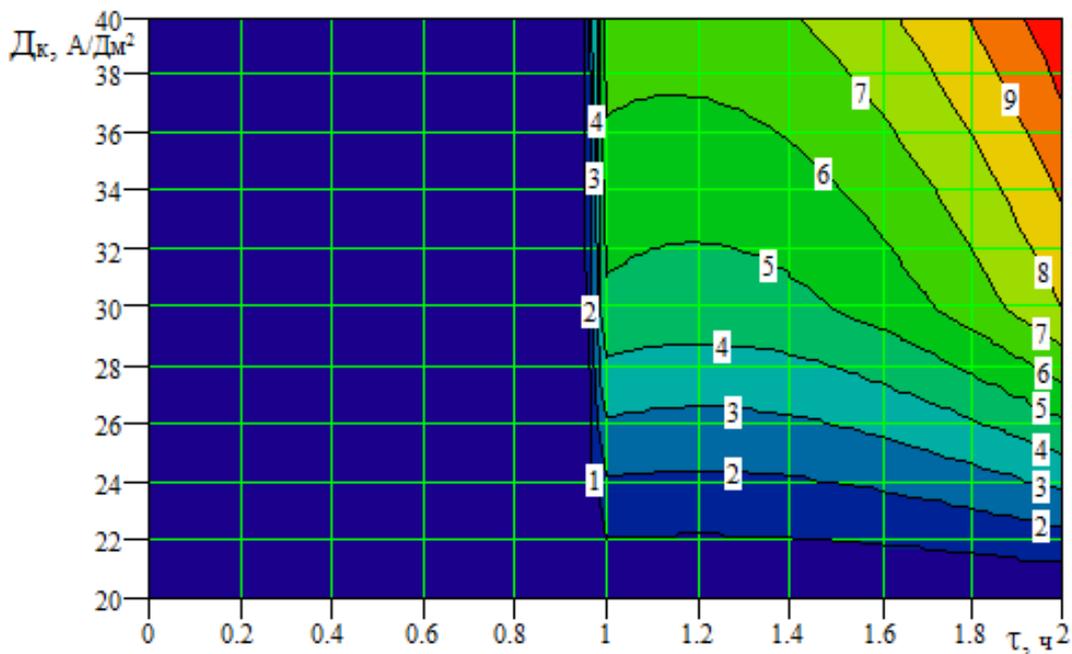


Рис. 4.18. Линии равного уровня значений среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k) при фиксированном значении температуры электролита $T=70^\circ C$

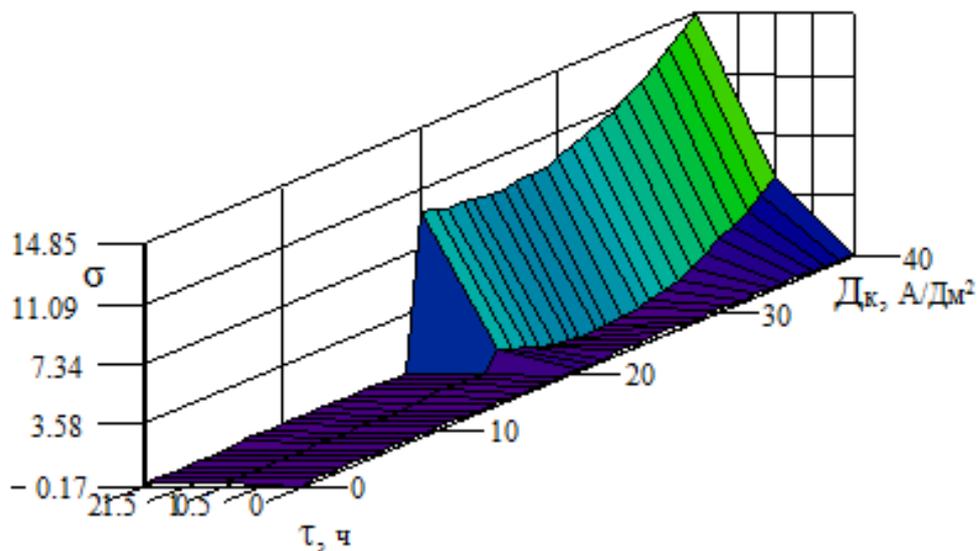


Рис. 4.19. Поверхность отклика в исследуемом факторном пространстве в зависимости среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k), при фиксированном значении температуры электролита $T=70^\circ C$

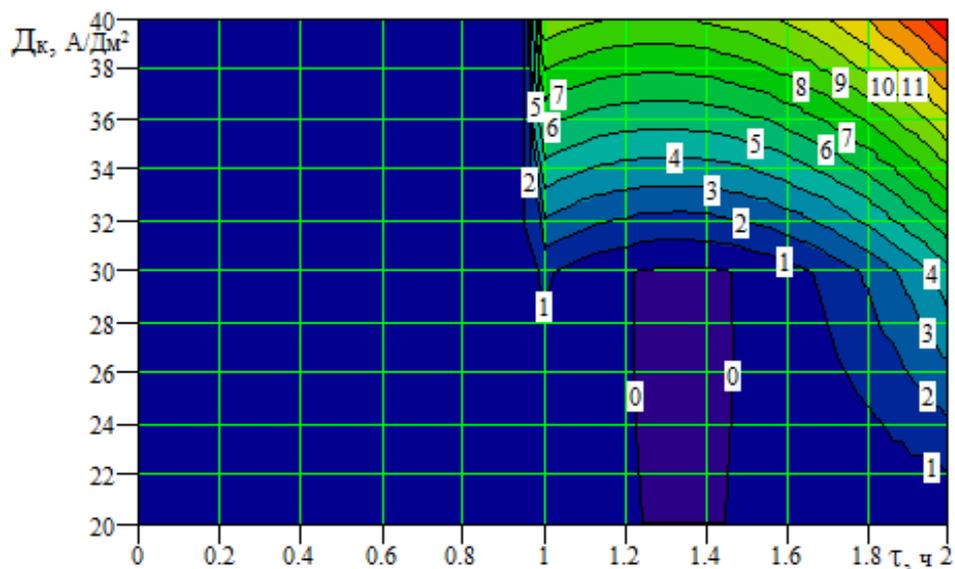


Рис. 4.20. Линии равного уровня значений среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k) при фиксированном значении температуры электролита $T=70^\circ\text{C}$

Полученные математические зависимости (модели) позволяют при заданных в области исследованного факторного пространства элементов режима электролиза определить искомые показатели точности заготовок, формообразуемых электролитическим железным покрытием с целью научно обосновать расчет припусков на черновую их обработку резанием и число ступеней обработки.

4.6. Исследование равномерности распределения покрытий электролитического железа в зависимости от плотности тока и степени разреженности пространства над уровнем электролита

Основной целью исследования является определение количественных значений плотности тока, обеспечивающих получение равномерных и гладких покрытий железа толщиной 0,4–0,8 мм в условиях разреженной атмосферы.

Равномерность покрытий железа и глубина пор в них определялись на основании микрометража образцов с помощью специального приспособления и измерительной индикаторной головки.

В качестве критерия равномерности покрытий железа выбрано отношение минимального значения толщины покрытий железа к максимальному. Наличие дендритов на образцах определялось визуально.

На основании результатов исследований распределения равномерности покрытий электролитического железа по восстанавливаемой поверхности разработаны рекомендации по режимам электролиза для технологических процессов восстановления поверхностей крупногабаритных деталей.

4.6.1. Условия формирования равномерных электролитических покрытий железа

Количество металла, осаждаемого на поверхность детали, зависит от количества электричества, прошедшего через электролит, а следовательно, от силы тока и времени электролиза. Если плотность тока одинакова на всех участках поверхности детали, то и толщина покрытий будет равномерной. Зависимость силы тока от сопротивления слоя электролита не позволяет обеспечивать одинаковую плотность тока на поверхности детали. Это приводит к неравномерной толщине гальванического покрытия и рассеиванию его физико-механических свойств.

1. Радикальным параметром процесса электролиза, способствующим уменьшению времени задержки на поверхности и размеров пузырьков водорода, является создание над уровнем электролита разреженного пространства (патент на изобретение №2082835).

С электрохимической точки зрения, падение потенциала складывается из омического падения потенциала в растворе, концентрационного перенапряжения и химического перенапряжения, связанного с энергией активации катодного и анодного процессов. Первые слагаемые характеризуют падение потенциала в объеме электролита. Концентрационное падение потенциала возникает вследствие изменения концентрации в объеме электролита. Последнее слагаемое представляет собой падение потенциала на самой поверхности электрода, точнее – в двойном слое на этой поверхности.

Электродвижущая сила, приложенная между электродами, определяется выражением:

$$V = \Delta\varphi_{\text{равн}} + \Delta\varphi_{\text{ом}} + \eta_{\text{конц}} + \eta_{\text{хим}}, \quad (4.19)$$

где $\Delta\varphi_{\text{равн}}$ – равновесный потенциал относительно выбранного электрода сравнения; $\Delta\varphi_{\text{ом}}$ – омическое падение потенциала; $\eta_{\text{конц}}$ – концентрационное перенапряжение; $\eta_{\text{хим}}$ – «химическое» перенапряжение, т.е. перенапряжение, связанное с приемом и отдачей электронов.

Для сравнения роли каждого из них рассмотрим эффективное сопротивление каждого из процессов. Полное эффективное сопротивление элементов цепи (без учета анодной поляризации) W определяется формулой

$$W = W_0 + W_1 + W_2. \quad (4.20)$$

Всю цепь можно представить, как последовательное включение линейного и двух нелинейных элементов. Линейным элементом является раствор с постоянной концентрацией, нелинейными элементами служат раствор с переменной концентрацией и область электрохимической реакции.

Распределение потенциала в электролите определяется наибольшим из трех слагаемых. Обычно не все они имеют одинаковый порядок величин. Омическое сопротивление W_0 сравнительно велико в электролизерах больших размеров. Оно определяется исключительно геометрическими размерами и формой электролизера, а также электропроводимостью электролита с постоянной концентрацией.

Как следует из теорий конвективной диффузии [159], если ток, текущий через электролизер, мал по сравнению с предельным диффузионным током, то изменением концентрации токопроводящих ионов в нем можно пренебречь и считать, что приложенная к электролизеру э.д.с. равна сумме омического падения потенциала и химического перенапряжения. Весь раствор можно характеризовать постоянной электропроводностью, а распределение тока в растворе искать из решения чисто электрической задачи. В том случае, если ток в электролизере сравним с предельным диффузионным током, то концентрационное перенапряжение резко увеличивается и приобретает ведущую роль в процессе электролиза. При этом влияние электрических и химических факторов на суммарную скорость процесса оказывается второстепенным и величина тока, идущего через электролизер, будет определяться быстротой доставки ионов к поверхности катода. Последнее определяется на практике обычно гидродинамическим режимом размешивания электролита.

При отсутствии концентрационного напряжения, когда размеры катода достаточно малы, распределение плотности тока на поверхности определяется ходом электрохимической реакции. Поскольку для хода все точки катода равноправны, плотность тока оказывается постоянной на поверхности.

В обратном предельном случае, имеющем место при весьма больших линейных размерах электрода, распределение плотности тока на катоде не зависит от электрохимической стадии реакции.

Плотность катодного тока D_k может быть выражена через следующее уравнение диффузионной кинетики [298]:

$$D_k = \frac{ZFД}{\sigma(C_0 - C)}, \quad (4.21)$$

где Z – заряд иона; F – число Фарадея; D – коэффициент диффузии; σ – толщина диффузионного слоя; C_0 – концентрация ионов в объеме электролита; C – концентрация ионов в прикатодном слое электролита.

Рост разности $C_0 - C$ при постоянном значении σ приводит к увеличению диффузионного тока. Если скорость электродной реакции велика, то C стремится к нулю (каждый ион, приближающийся к электроду, немедленно вступает в реакцию). В этом случае D_k принимает наибольшее возможное при данной величине σ значение:

$$D_k = \frac{ZFД}{\sigma C_0}. \quad (4.22)$$

В неподвижном электролите толщина диффузионного слоя будет постоянно расти, и постепенно этот слой распространяется на всю толщину электролита. Однако обеспечить неподвижность электролита невозможно. Электродный процесс, приводящий к изменению концентрации электролита около электрода, служит причиной, вызывающей движение электролита. При восстановлении катионов металла с образованием осадка изменяется плотность электролита, что вызывает изменение характера диффузионного слоя и конвекционный поток электролита.

Характер изменения диффузионного слоя зависит от расположения катода. Если катод расположен горизонтально, то более плотные слои электролита, находящиеся выше, устремляются вниз, уменьшая этим толщину σ , а менее плотный раствор у поверхности катода будет всплывать. При вертикальном расположении катода тоже возникает конвекционный поток. При горизонтальном расположении катода менее плотный диффузионный слой не вызовет конвекционных потоков, причем его толщина более равномерна и увеличивается со временем.

Движение электролита относительно электрода стабилизирует толщину диффузионного слоя и делает ее меньше. В связи с этим нельзя рассматривать диффузионный слой как неподвижный. В диффузионном слое сохраняется еще движение электролита относительно поверхности электрода, но растворенное в нем вещество переносится за счет молекулярной диффузии, а не за счет движения электролита. Связь между плотностью тока и предельным током в электролизере можно выразить в виде уравнения [277]:

$$-\varphi = a + v \ln \left(\frac{i_k}{I \frac{i_k}{i_{пр}}} \right) \quad (4.23)$$

Из уравнения (4.23) видно, что пока $I < I_{пр}$, последний член равен $v \cdot \ln i$. При этом выражение принимает обычный вид уравнения электрохимической кинетики:

$$-\varphi = a + v \cdot \ln i. \quad (4.24)$$

Если I вырастает, то знаменатель приближается к нулю и выражение $v \cdot \ln \frac{i}{i_{пр}}$ быстро растет. При $I = i_{пр}$ поляризация электрода $-\Delta\varphi \rightarrow \infty$. Это

означает, что теряется зависимость скорости от $-\Delta\varphi$, при данной плотности тока потенциал может принимать различные значения. Или, другими словами, на катоде скорость протекания реакции определяется чисто диффузионной кинетикой. Из вышерассмотренного анализа вытекают важные выводы для обеспечения получения равномерных покрытий железа.

Первый – равномерность электролитических покрытий металлов, в том числе и железа, на деталях различных размеров и конфигураций может быть обеспечена на основании расчета геометрических параметров между деталями и анодами и стенками электролизера, исходя из решения чисто электрической задачи, если $i < \frac{1}{2} i_{пр}$.

Второй – равномерность электролитических покрытий металлов на деталях может быть обеспечена при условии создания диффузионного слоя равномерной толщины, исходя из условий гидродинамического движения электролита, если $\frac{1}{2} i_{пр} < i < i_{пр}$.

Третий – стремление проводить процесс электролиза металлов при $i \rightarrow i_{пр}$ приводит к уменьшению толщины покрытия металлов в связи с началом образования зародышей дендритов на растущей поверхности покрытия.

Четвертый – на равномерность электролитических покрытий оказывают существенное влияние выделяющиеся совместно с ними пузырьки водорода, которые не только уменьшают электропроводность электролита, но и сокращают истинную поверхность, на которой осаждается металл.

4.6.2. Влияние газовых пузырьков водорода на дефекты и равномерность электролитического слоя железа, осаждаемого на поверхность железоуглеродистых сплавов

Экспериментальные данные показывают, что при железнении образцов, независимо от начальной кислотности электролита, осаждение железа начинается лишь после достижения предельного тока водорода [21, 22]. Относительные скорости выделения железа и водорода зависят от условий электролиза (pH , D_k , t), природы солей железа, наличия различного вида добавок. Так, например, скорость выделения водорода в зависимости от условий электролиза может колебаться от долей до десятков процентов скорости катодной поляризации.

Процесс возникновения пузырька молекулярного водорода на границе электрод – кислый электролит можно представить следующими последовательно возникающими во времени стадиями.

С термодинамической точки зрения, образование атомарного водорода возникает под влиянием приложенного потенциала разряда водорода. Между поверхностью железоуглеродистого сплава и атомом водорода образуется «гидридная связь». По своей физической природе она не является отдельным типом связи, но по своей роли ее целесообразно выделить в отдельную категорию. Это обусловлено особенностями строения атома водорода.

Образованию гидридной связи между железом и атомарным водородом предшествует водородная связь в толще электролита, которая всегда имеет

место, благодаря малому размеру иона водорода (протона), и которая обладает высокой энергией.

Сущность водородной связи состоит в том, что электрон и протон движутся так, что в кристалле возникают обусловленные их движением связи, называемые водородными. Важно при возникновении водородных связей то, что первой заполненной электронной оболочкой в кулоновском поле является оболочка с двумя электронами. Поэтому атом водорода может образовывать лишь одну ковалентную связь, что очень существенно для характеристики структуры соответствующих ковалентных кристаллов. Образующийся атом водорода, обладающий большой активностью, адсорбируется поверхностью катода.

В зависимости от химического состава и состояния железоуглеродистых сплавов атомы удерживаются на поверхности с различной силой. В кислых растворах выделение атомарного водорода может быть описано выражением:



Поскольку ион водорода в растворе гидратирован, стадию его разряда можно представить в виде:



Образование молекулярного водорода из атомов (рекомбинация). Молекулы водорода значительно менее склонны к адсорбции, чем атомы. Поэтому они покидают поверхность, частично переходя в электролит и по преимуществу образуя пузырьки газа. Существование газовой фазы возможно при условии $p < p_1$, где p – давление водорода в пузырьке, p_1 – внешнее давление. В противном случае пузырек захлопнется. Эта стадия, протекающая по каталитическому механизму, может быть представлена в виде:



В определенных условиях обе стадии катодного процесса – разряд ионов H^+ и выделение молекулярного водорода – могут протекать одновременно. При этом удаление водорода с поверхности электрода может протекать по электрохимическому механизму:



Рост водородного пузырька. Поскольку извне приложен достаточно большой термодинамический потенциал, дальнейшее существование пузырька связано с непрерывным увеличением его радиуса. Связь между p , p^1 и радиусом пузырька « r » может быть представлена в виде уравнения Кельвина [195]:

$$\frac{RT \ln p^1}{p} = \frac{2\sigma V}{r}, \quad (4.29)$$

где R – газовая постоянная; T – температура; σ – поверхностное натяжение; V – молярный объем.

Из уравнения (4.29) следует, что давление в пузырьке водорода увеличивается. Разница давлений приводит к появлению избыточного давления $\Delta p = p - p^1$. Избыточное радиальное давление Δp служит причиной разрыва электролита на границе раздела «электрод – электролит» и оттеснения его в радиальном направлении на некоторое расстояние. Величина Δp зависит от конечного значения радиуса водородного пузырька, который он приобрел в момент отрыва.

Отрыв водородного пузырька. На зародыш пузырька действуют подъемная сила и сила поверхностного натяжения. Связь между подъемной силой и размером пузырька может быть представлена в виде [277]:

$$F = \frac{4}{3\pi r^3 \rho g}, \quad (4.30)$$

где r – радиус пузырька; ρ – плотность электролита; g – ускорение силы тяжести.

Поскольку объем пузырька мал, то подъемная сила F недостаточна для осуществления работы отрыва водородного пузырька от поверхности электрода. Однако, по мере роста пузырька, сила F увеличивается и при некотором значении его радиуса оказывается в состоянии совершить работу отрыва водородного пузырька от поверхности.

Формы и размеры отрывающихся пузырьков водорода определяются силой поверхностного натяжения. На рис. 4.21 изображен пузырек водорода γ , сидящий на поверхности катода α в растворе электролита β . Равновесие пузырька определяется величинами межфазовых натяжений на трех поверхностях раздела: электролит – газ ($\sigma\beta\gamma$); катод – электролит ($\sigma\alpha\beta$), газ – твердое тело ($\sigma\alpha\gamma$). Пузырек водорода не будет изменять свою форму, т. е. краевой угол φ будет постоянен, если силы, действующие по линии соприкосновения трех фаз (жидкой, твердой и газовой), будут взаимно уравновешены.

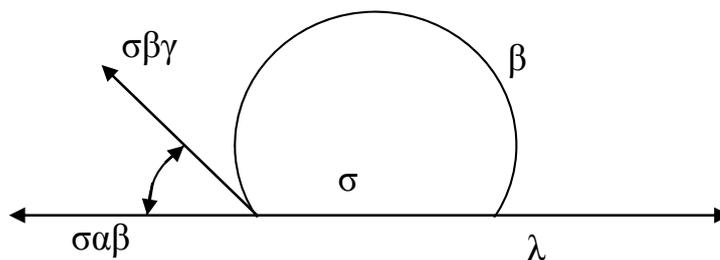


Рис. 4.21. Равновесное состояние пузырька водорода, выделяющегося на поверхности осаждаемой детали (катоде)

Условием равновесия будет соблюдено равенство:

$$\sigma\alpha\beta + \sigma\beta\gamma \cos\vartheta = \sigma\alpha\gamma, \quad (4.31)$$

или

$$\cos \vartheta = \frac{(\sigma_{\alpha\gamma} - \sigma_{\alpha\beta})}{\sigma_{\beta\gamma}}. \quad (4.32)$$

В зависимости от величины трех межфазовых натяжений краевой угол φ будет велик или мал (рис. 4.21). В первом случае пузырек будет иметь плоскую форму и вытеснять электролит с поверхности катода, в последнем случае пузырек будет приближаться к форме целого шара, т.е. электролит будет вытеснять газ с поверхности катода. Очевидно, что при изменении потенциала должна изменяться величина $\sigma_{\alpha\beta}$. Натяжение $\sigma_{\alpha\gamma}$ тоже может несколько изменяться с поляризацией вследствие наличия адсорбционной пленки электролита на поверхности α/γ , в которой должен существовать двойной слой, однако это изменение относительно мало. Натяжение на $\sigma_{\beta\gamma}$ вообще не зависит от потенциала. Следовательно, следя за изменением угла φ при изменении потенциала, можно следить за изменением, главным образом, величины $\sigma_{\alpha\beta}$. Пузырьки наибольших размеров выделяются при потенциале электрода, близком к потенциалу нулевого разряда. При этом краевой угол смачивания имеет максимальную величину. Краевой угол и размеры газовых пузырьков уменьшаются при более электроотрицательном и электроположительном потенциале электрода по сравнению с потенциалом нулевого разряда. Объем газовых пузырьков увеличивается $\varphi \rightarrow 60^\circ\text{C}$ в параболической зависимости, начиная со значения $\varphi = 20^\circ\text{C}$.

Движение газовых пузырьков в электролите. Экспериментально движение газовых пузырьков изучалось многими исследователями [195, 196, 277]. Результаты всех проделанных работ могут быть резюмированы следующим образом:

скорость движения пузырьков диаметром 0,2–1,5 мм почти не зависит от диаметра пузырька и равна примерно 28–30 см/с;

пузырьки большого размера поднимаются с несколько большими скоростями, а именно около 35–40 см/с, но оказываются малоустойчивыми.

4.6.3. Влияние газовых пузырьков на распределение тока на катоде

При прохождении тока через электролитическую ячейку наблюдается падение напряжения, связанное с преодолением сопротивления электролита. Падение напряжения, обусловленное преодолением сопротивления, зависит от плотности, пути тока в электролите и его удельного сопротивления.

Удельное сопротивление электролита зависит от степени его заполнения и может быть выражено как

$$r_r = K \cdot r, \quad (4.33)$$

где K – коэффициент увеличения удельного сопротивления из-за наличия в нем газовых пузырьков; r – удельное электрическое сопротивление чистого электролита.

Удельное сопротивление электролита зависит от его температуры и концентрации. Коэффициент увеличения сопротивления электролита от включения в него газовых пузырьков зависит не только от плотности тока и конструкции электролитической ячейки, но и от температуры и вязкости электролита, определяемой его концентрацией.

Различные технологические и конструктивные факторы по-разному могут влиять на распределение тока в электролите. Так, уменьшение расстояния между электродами может привести к увеличению газового наполнения электролита и коэффициента K в выражении (4.33). С повышением температуры и одновременным снижением удельного сопротивления для чистого электролита может наблюдаться увеличение его удельного сопротивления из-за роста газонаполнения.

Сопротивление прохождению тока в электролите существенно возрастает в присутствии газовых пузырьков, образующихся от электродов и движущихся в электролите вверх. Пузырьки сужают сечение электролита (при этом повышается фактическая плотность тока в электролите) и удлиняют путь движения тока.

Под газонаполнением понимают отношение объема влажного газа, распределенного в виде пузырьков в электролите к общему объему газонаполненного электролита:

$$b = \frac{V_{\Gamma}}{V_{\text{ж}} + V_{\Gamma}}, \quad (4.34)$$

где b – газовое наполнение; $V_{\text{ж}}$ – объем жидкой фазы в электролите; V_{Γ} – объем газовой фазы в электролите [196].

Газовое наполнение электролита определяется соотношением скоростей двух процессов, образованием газовых пузырьков в электролите, заполняющем ячейку, и отводом, отделением их от электролита. Газонаполнение электролитов возрастает с увеличением плотности тока, высоты электродов, вязкости электролита и уменьшением расстояния между электродами, т.е. уменьшением объема электролита в ячейке. Количество выделяющегося газа линейно увеличивается с повышением плотности тока, а газонаполнение возрастает при этом в меньшей степени. Это объясняется укрупнением размеров газовых пузырьков при подъеме их в электролите вследствие слияния пузырьков по мере увеличения пути или движения жидкости с ростом высоты электрода и увеличением интенсивности образования пузырьков газа с ростом плотности тока.

С повышением температуры вязкость электролита снижается, что способствует увеличению скорости подъема газовых пузырьков, т.е. уменьшению газонаполнения. Одновременно с ростом температуры увеличивается объем газа, как за счет расширения, так и вследствие повышения парциального давления паров воды, насыщающих газ. При температуре в 70...80 °С газонаполнение мало изменяется с ее ростом, а иногда даже

снижается. Выше 70...80 °С влияние увеличения объема газов является определяющим, и газонаполнение возрастает, особенно при 100...105 °С. Величина газонаполнения зависит от скорости подъема газовых пузырьков в электролите. Кроме вязкости, на скорость подъема влияют размеры пузырьков.

Широкомасштабные исследования по равномерности распределения толщины покрытия электролитического железа на клапанах, проведенные в производственных условиях, показали, что наблюдается совершенно одинаковый характер распределения величины покрытия по длине клапана [36, 44, 217, 218]. Конусность покрытия r_n зависит от его толщины и достигает значительных величин до 0,3 мм при расчетной толщине 0,7 мм на сторону, что свидетельствует о значительной неравномерности распределения тока по длине стержня клапана.

На основании этих же исследований установлено, что характер распределения толщины покрытия на клапанах по подвескам зависит от равномерности газонаполнения между рядами анодов и деталей – катодов, расположенных вдоль ванны железнения.

4.6.4. Влияние разрежения над зеркалом электролита на точность размеров, формы и качество поверхностного слоя заготовок

Совместный разряд ионов металла и водорода, протекающий при электролизе металлопокрытий, как уже отмечалось ранее, приводит к изменениям структуры и свойств покрытий. Определенную роль в этом играет адсорбирующийся в процессе электролиза на катоде водород [22, 33, 40, 50]. Неравномерность газонаполнения выделяющимся водородом и растворенным в электролите кислородом в межэлектродном пространстве влияет на равномерность распределения толщины наносимого покрытия по длине и диаметру детали [50]. Газонаполнение электролита определяется соотношением скоростей двух процессов: образования газовых пузырьков в электролите и отделения их от электролита. Скорость первого процесса превышает скорость второго, в результате чего в электролите при непрерывной работе накапливается газ в виде пузырьков. Газонаполнение следует рассматривать как отрицательный процесс, ибо оно вызывает изменение удельного электрического сопротивления в сторону увеличения, и, следовательно, ведет к перераспределению фактического значения катодной плотности тока, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показали, что значительную роль при формировании равномерных металлопокрытий играет процесс десорбции водорода с поверхности покрытий [153–156]. На их основе разработан принципиально новый способ формирования покрытия в контролируемой разреженной атмосфере над зеркалом гальванической ванны (патент № 2082835) [238]. Эксперименты, поставленные в

этих условиях, подтвердили теоретические предпосылки о значительном сокращении количества поглощаемого водорода и, как следствие, – получении более равномерных и гладких покрытий с оптимальной величиной припуска на механическую обработку [23, 24, 44, 49, 40, 23].

На рис. 4.22 приведены кривые распределения электролитического железного покрытия по длине образца, полученные в обычных условиях электролиза и с созданием разрежения над зеркалом электролита. Анализируя их, можно видеть, что разрежение над зеркалом электролита оказывает существенное влияние на распределение силовых линий по поверхности детали, так как при этом облегчаются условия отрыва пузырьков водорода с поверхности образца, уменьшается время его роста и задержки на поверхности образца, вследствие чего уменьшается неравномерность газонасыщения межэлектродного пространства.

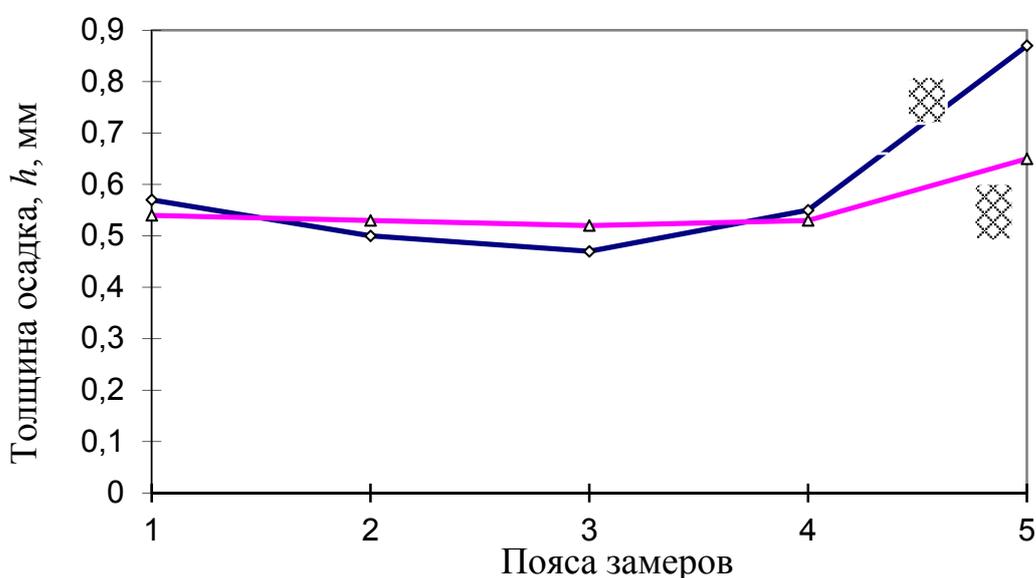


Рис. 4.22. Распределение электролитического железного покрытия по длине образца, в обычных условиях (1) и при разрежении над зеркалом электролита (2)

Это позволяет предположить, что именно молекулярный водород, образующийся на покрываемой поверхности образцов, играет доминирующую роль в равномерности распределения силовых линий при формировании электролитических покрытий железа. Толщина покрытия как контролируемый показатель качества деталей, восстановленных электролитическим железом, является случайной величиной и, как показывают исследования [24, 36, 49, 44], подчиняется нормальному закону распределения. При замерах образца в поясе 3 (рис. 4.22), обеспечивающем наименьшую толщину покрытия, именно он является критическим, так как определяет достаточность припуска на механическую обработку, при этом наблюдается смещение (Δh) его математического ожидания относительно расчетного значения в сторону уменьшения.

Смещение выборочной средней M_x , толщины покрытия Δh свидетельствует о наличии систематической ошибки. Оно вполне закономерно и связано с неравномерностью распределения тока на детали, вследствие экранирования восстанавливаемой поверхности выделяющимся при электролизе водородом [24, 49]. На покрываемой поверхности железородистых сплавов образуется водородный «барьер», который, увеличивая электролитическое сопротивление, способствует неравномерному распределению тока и толщины покрытия на ней. Наблюдаемое смещение Δh в сторону уменьшения вполне объяснимо и связано с местом замера, где истинное значение плотности тока, а следовательно, и толщины покрытия меньше, чем расчетное. Величина смещения выборочной средней толщины покрытия колеблется в достаточно широких, значимых пределах $M_{\Delta h}=12,242\dots 12,728$ мм. Среднеквадратическое отклонение толщины покрытия σ_h , как мера рассеивания фактических значений из-за действия случайных факторов, также колеблется в широких, существенно значимых пределах: $\sigma_h=0,011\dots 0,031$ мм. Кроме всего прочего, на образцах, полученных в обычных условиях, наблюдается влияние краевого эффекта, т.е. идет перераспределение силовых линий большей частью по краям образца, и покрытие имеет сильно выраженную седлообразную форму (рис. 4.23, кривая 1). Конусность покрытия ρ_1 достигает значительных величин – до 0,25 мм при расчетной толщине 0,3 мм на сторону, что свидетельствует о значительной неравномерности распределения тока по длине образца.

Изменяя степень разреженности пространства над уровнем электролита, возможно оказывать влияние на скорость удаления с поверхности пузырьков молекулярного водорода, но не увеличивать скорость рекомбинации атомарного водорода в молекулярный [158, 159, 315]. Разрежение над зеркалом электролита интенсифицирует процессы десорбции газовой фракции, уменьшая время роста и облегчая условия отрыва пузырьков водорода с поверхности образца. При этом экранирующее воздействие ослабевает, и большая часть образца остается открытой (рис. 4.23), что способствует более равномерному распределению силовых линий по формируемой поверхности [40, 21]. Краевой эффект все равно наблюдается, но уже в меньшей степени.

Поднимаясь вверх, пузырьки водорода создают конвективный перенос ионов железа в прикатодный слой, что также улучшает распределение железного покрытия по длине образца вследствие уменьшения диффузионных ограничений [154, 320]. Погрешность формы по длине, конусность покрытия на образцах, полученных в обычных условиях, составляет 0,25 мм, а на образцах, полученных при создании разрежения над зеркалом электролита, 0,05 мм, при расчетной толщине покрытия 0,3 мм на сторону [50]. Качество точности образцов, формованных электролитическим железным покрытием в обычных условиях, JT16, а при разрежении JT10 [49].

В силу специфики процесса электроосаждения железа, как отмечалось ранее, покрытия формируются в условиях, когда имеет место одновременный разряд ионов металла и водорода. Адсорбция образующихся пузырьков молекулярного водорода на поверхности катода препятствует осаждению металла под ними (рис. 4.24).



Рис. 4.23. Десорбция водорода с покрываемой поверхности образца при разрежении над зеркалом электролита



Рис. 4.24. Адсорбция водорода, выделяющегося при электролизе, на поверхности катода

В результате этого на поверхности покрытий появляются не заполненные металлом углубления (питтинг), которые иногда пронизывают всю толщину осадка (рис. 4.25). В некоторых случаях пузырьки, которым удалось сравнительно прочно закрепиться на поверхности катода, постепенно обрастают металлом, и тогда в покрытиях возникают замкнутые полости, так называемые «водородные камеры» [103, 166, 320]. Все факторы электролиза, приводящие к уменьшению вероятности образования зародышей пузырьков водорода и увеличению скорости их роста, препятствуют возникновению питтинга и водородной пористости в покрытиях [56].

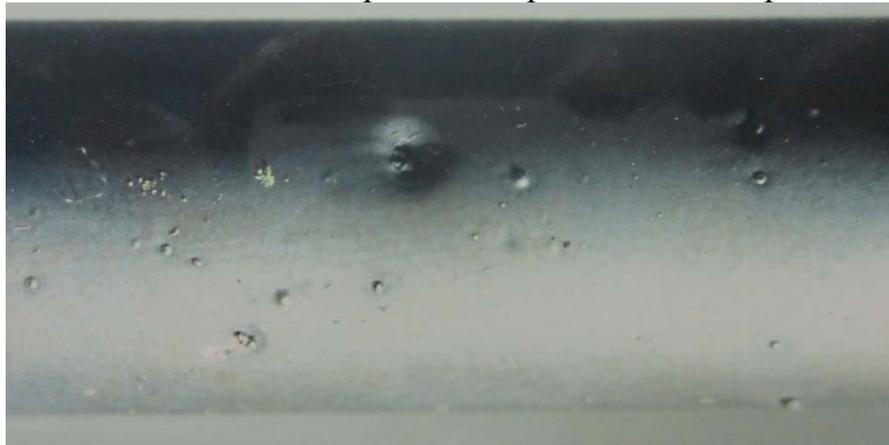


Рис. 4.25. Питтинг на поверхности образца, вследствие длительной адсорбции водорода

В общем случае пористость гальванопокрытий зависит от условий электролиза и в значительной степени определяется соотношением скоростей зарождения центров кристаллизации и их роста [141]. Кроме питтинга, на поверхности образцов, полученных в обычных условиях, наблюдаются наросты (дендриты). За счет значительного уменьшения расчетной площади образца экранирующим водородом происходит увеличение плотности тока и его перераспределение на открытых между пузырьками участках, что приводит к образованию дендритов (рис. 4.26).

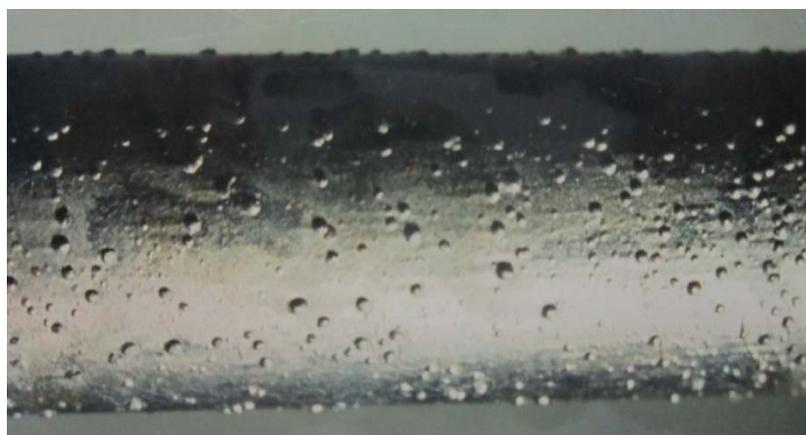


Рис. 4.26. Дендритообразование при железнении в обычных условиях

На образцах, полученных в условиях разрежения над зеркалом электролита, этих дефектов не наблюдается [21, 56]. Очевидно, пузырьки водорода, движущиеся вверх, создают конвективные потоки, что улучшает фронт «питания» растущего покрытия, уменьшается время роста и задержки пузырьков водорода на формируемой поверхности, снижается его экранирующее действие, увеличивается скорость возникновения зародышей кристаллизации при электроосаждении покрытий. Это повышает дисперсность получаемых слоев, при этом осадки железа достаточно равномерные по длине и гладкие (рис. 4.27).



Рис. 4.27. Образец, полученный при железнении с созданием разрежения над зеркалом электролита

На рис. 4.28, 4.29 приведены фотографии поперечных микрошлифов образцов с электролитическим железным покрытием, полученным в обычных условиях и при разрежении над зеркалом электролита, при увеличении $\times 500$. Формирование покрытий на поверхности основы начинается с образования на ней кристаллических зародышей осаждаемого металла [141, 329]. Возникшие на подложке кристаллические зародыши при электролизе обычно разрастаются до образования сплошного слоя покрытия. Чем больше возникает зародышей и выше скорость их роста, тем меньше толщина образующегося на поверхности подложки сплошного осадка, структура которого, прежде всего, определяется характером взаимодействия объединяющихся друг с другом кристаллитов.

Срастание кристаллитов обычно начинается с образования между ними мостиков, имеющих аморфную структуру и меньшую толщину, чем сами кристаллиты. Возникновение мостиков происходит разными путями; заполнением площади между крупными кристаллитами большим числом мелких зародышей; разрастанием бесформенных узких перетяжек; ростом нитевидных кристаллов, соединяющих кристаллиты [154]. В покрытиях, полученных при электролизе в обычных условиях, наблюдается развитие кристаллов по механизму слоистого роста. Формирование кристаллов по

этому механизму осуществляется путем образования двумерных зародышей, распространяющихся по грани в виде слоев одноатомной или многоатомной толщины. В большинстве случаев кристаллы растут путем закономерного перемещения по поверхности грани многоатомных слоев роста (пакетов), толщина которых в зависимости от режимов электролиза изменяется в широких пределах (0,01–1 мкм) [247].

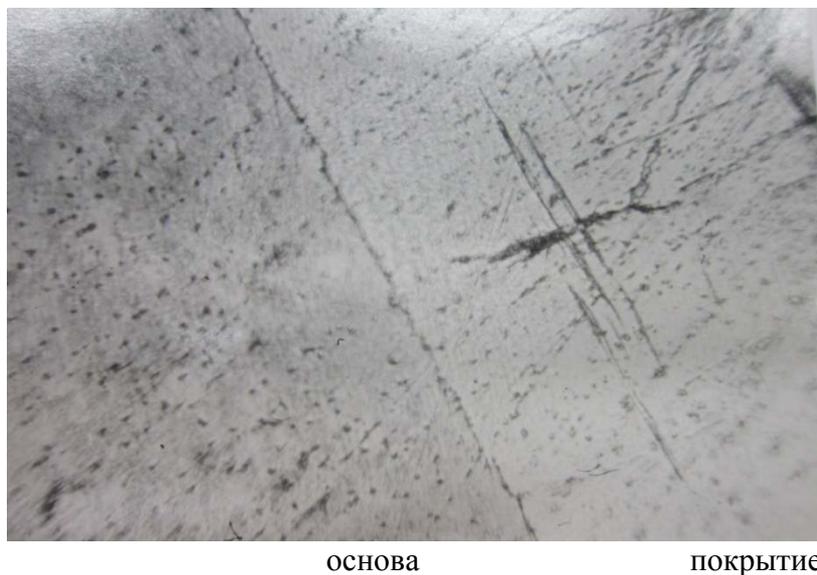


Рис. 4.28. Структура электролитического железа, полученного в обычных условиях

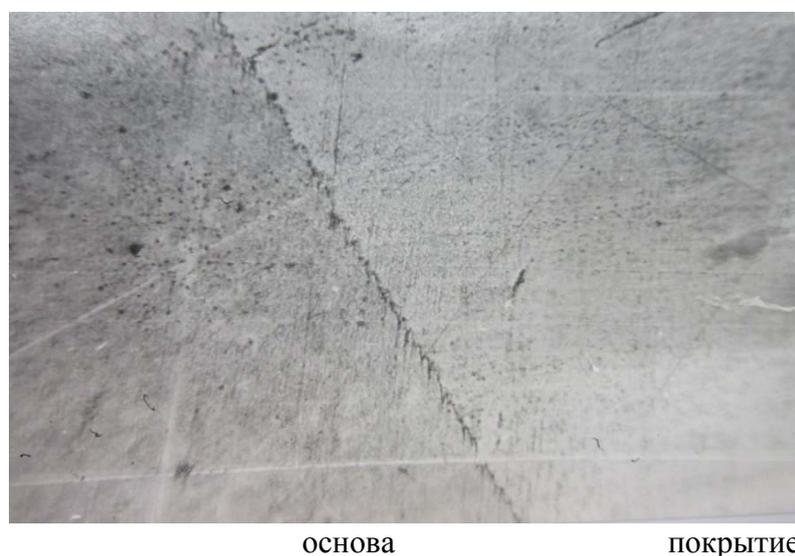


Рис. 4.29. Структура электролитического железа, полученного при разрезании над зеркалом электролита

Причина образования многоатомных слоев роста – пассивация катода в результате адсорбции на гранях растущего кристалла различного рода веществ [103]. Роль адсорбата могут выполнять молекулы растворителя, ионы, не участвующие непосредственно в электродной реакции, примеси

органических соединений, атомы и молекулы водорода, гидроксиды металлов и другие частицы [157]. При образовании на грани двухмерного зародыша его поверхность будет некоторое время свободной от адсорбированных чужеродных частиц, и на ней с наименьшими энергетическими затратами может возникнуть новый зародыш. Такое явление последовательного наслоения двухмерных зародышей формирует слой или «пакет» роста. Толщина «пакета» зависит от ряда факторов и определяется концентрацией разряжающихся ионов металла в зоне наслоения зародышей и степенью пассивации его поверхности. После завершения развития «пакета» по нормали происходит его тангенциальный рост вдоль поверхности грани [141]. К моменту достижения слоев края грани, у места его зарождения вследствие диффузии восстанавливается начальная концентрация разряжающихся ионов. Поэтому вновь создаются условия для возникновения следующего слоя.

Периодичность процессов роста приводит к образованию на катоде кристаллов, состоящих из множества субзерен слоистого типа (рис. 4.30).

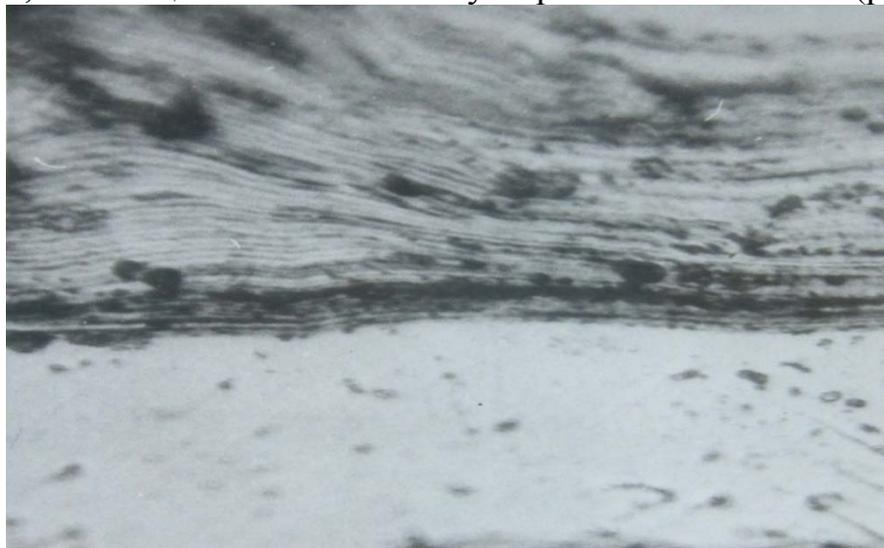


Рис. 4.30. Слоистость структуры электролитического железа, полученного в обычных условиях электролиза

Совершенство структуры кристаллов, растущих по механизму слоистого роста, главным образом, определяется характером двухмерного зародышеобразования в период возникновения нового слоя «пакета». Зарождение каждого последующего слоя начинается с появления двухмерного зародыша на поверхности предыдущего. Возникновение зародыша в нормальном положении должно приводить к срастанию слоев и отсутствию между ними каких-либо границ. Однако в реальных условиях поверхность растущего кристалла в той или иной степени покрыта адсорбированными чужеродными частицами, и возникающие на ней зародыши могут оказаться разориентированными относительно нижележащего слоя. Вследствие этого при нарастании слоев друг на друга возникает кристаллографическое

несоответствие решеток. Компенсация такого несоответствия может происходить из-за появления сеток дислокаций, располагающихся в плоскости сопряжения слоев.

На начальных стадиях электроосаждения иногда наблюдается эпитаксиальный рост кристаллов. В этом случае кристаллы осаждаемого металла воспроизводят структуру кристаллов подложки и приобретают форму и ориентацию последних [132]. Такой рост возможен вследствие ориентационного соответствия отдельных плоскостей кристаллических решеток обоих металлов. Толщина осадка, при которой прекращается влияние подложки на его структуру, в основном зависит от различия в параметрах решеток данной пары металлов и условий электролиза. Как видно на рис. 4.13, осадки электролитического железа имеют ярко выраженную дендритообразную структуру, состоящую из относительно больших продолговатых волокон. Волокна вытянуты по одной из кристаллографических осей, расположенной перпендикулярно к поверхности образца, на которую осаждается железо. Волокнистая структура железных покрытий с волокнами, расположенными перпендикулярно поверхности покрытия, по мнению отдельных исследователей, является благоприятным фактором при оценке сопротивления металла износу [211]. Из всех испытанных В.А. Шадричевым видов металлопокрытий [316] наибольшую износостойкость показали электроосажденные металлы: хром и железо, которые имеют однотипную структуру (с выраженной текстурой), отличную от структуры обычных металлургических металлов [333, 337]. Выявленный в отдельных исследованиях низкий коэффициент трения электролитического железа объясняется, по-видимому, также особенностью структуры электролитических осадков [212, 100]. Другой характерной особенностью структуры покрытий железа является наличие трещин (рис. 4.31), которые, в свою очередь, также расположены по нормали к поверхности образца. Такая ориентация волокон и трещин определяется, по всей вероятности, характером образования текстуры покрытий железа. Наличие трещин в покрытиях железа указывает на возникновение в них внутренних напряжений, превышающих предел прочности электролитического железа [22, 163, 285, 324].

Характер трещиноватости, главным образом, зависит от структурных особенностей осадков, а также от наличия в них неметаллических включений (частиц гидроокиси, продуктов их распада) [211, 222]. При соосаждении с металлом посторонних веществ, трещины обычно возникают в местах скопления включений. Последние располагаются преимущественно по границам зерен – это приводит к ослаблению связи между ними и соответственно к растрескиванию осадка. Кроме того, трещиноватость покрытий обусловлена неравномерным распределением водорода и остаточных напряжений по толщине осадка. Все факторы, способствующие наводороживанию покрытий, приводят к трещинообразованию, сопровождающемуся разгрузкой осадков и снятием в них остаточных напряжений

[22, 251]. Структура покрытий, полученных в условиях разрежения над зеркалом электролита, отличается отсутствием слоистости в покрытии и меньшим числом трещин, что свидетельствует о более монолитном покрытии, с меньшим содержанием гидроокиси и более высокой прочностью самого осадка (рис. 4.29) [56].

4.7. Выводы

1. Исследование электрохимического состояния железоуглеродистого сплава показало, что перенапряжение выделения водорода в значительной степени снижается в зависимости от степени разреженности атмосферы над уровнем электролита. Так, в электролите, нагретом до 55 °С, с разреженностью над зеркалом электролита 75%, величина снижения перенапряжения водорода соответствует перенапряжению водорода в электролите, нагретом до 80 °С при нормальных условиях.

В связи с этим появляется возможность произвольного увеличения или уменьшения количества выделяющегося водорода в зависимости от степени разреженности атмосферы, что особенно важно в первоначальный период формирования покрытий электролитического железа на поверхности. Исследование структурных преобразований в электролитическом железе, полученном в электролите, нагретом до 55 °С, показало, что получение контактного слоя железа без наличия в нем трещин обеспечивается в тех случаях, когда выход железа по току равен не менее 15% и не более 30%.

2. Исследование адгезионной связи покрытий электролитического железа с поверхностью детали показало, что максимальное значение прочности сцепления осадка обеспечивается тогда, когда формирование покрытия осуществляется при значении катодной плотности тока от 5 до 8 А/дм², температуре электролита 55 °С и степени разреженности атмосферы 70...75 %.

3. Установлена возможность достаточно произвольного регулирования выхода железа по току в начальный период электролиза, в пределах от 0 до 30%, что при опускании деталей в ванну под током предотвращает саморастворение поверхности в кислых электролитах и осаждение на ней гидроокисных соединений железа, препятствующих образованию адгезионной связи между электролитическим железом и железоуглеродистым сплавом.

4. Установлена возможность ускоренного удаления водорода с поверхности детали при электролизе железа за счет создания разреженного пространства над электролитом, что позволяет получать равномерные гладкие осадки железа, открывает перспективы для разработки конструкций установок, обеспечивающих снижение энергетических и материальных затрат, а также уменьшение вредных выбросов в окружающую среду. Разреженность пространства над зеркалом электролита способствует созданию однородного электрического поля и формированию более

равномерных покрытий на макропрофиле. При степени разреженности 60...65% степень неравномерности электролитических железных покрытий по толщине уменьшается в 2,6 раза.

5. Микроструктура покрытий железа, формируемых в условиях разрежения над зеркалом электролита, отличается от покрытий, полученных в обычных условиях, отсутствием слоистости и меньшим числом трещин, при этом прочность электролитического железа повышается в 1,8 раза, что говорит о более монолитном осадке.

6. При температуре электролита 70 °С за счет создания допустимой степени разреженности средняя высота микронеровностей поверхности осадка уменьшается в 2,5 раза.

7. Выполненные исследования позволяют предложить для восстановления изношенных деталей автомобилей новый вариант начального периода формирования электротехнического железа на поверхности железоуглеродистых сплавов, возможность практического осуществления которого основывается на применении разреженного пространства над уровнем электролита.

5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ ПО ИХ ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

5. 1. Обоснование нормативов ресурса и предельного технического состояния элементов двигателя

Выполненные исследования в соответствии с методикой, изложенной в главе 2 по проведению моторных испытаний ресурсопределяющих деталей (шатун, коленчатого вала, блока цилиндров, турбокомпрессора) силового агрегата позволили определить параметры изменения их технического состояния от наработки. Результаты исследуемых параметров по шатуну приведены на рис.5.1 [26].

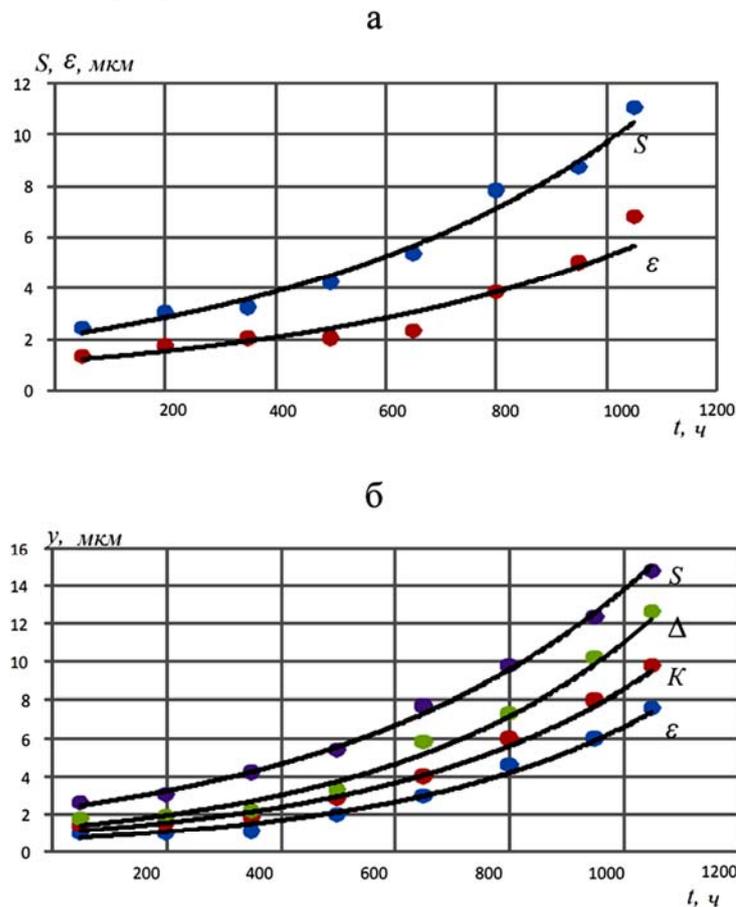


Рис. 5.1. Изменение показателей технического состояния шатуна в процессе стендовых моторных испытаний двигателя КамАЗ:

- а - диаметральный износ втулки верхней головки, S ; овальность втулки верхней головки, ε ;
б - диаметральный износ нижней головки, S ; остаточный прогиб вкладышей, Δ ;
корсетность нижней головки, K ; овальность нижней головки, ε

Математическая обработка этих результатов сведена в табл. 5.1 [26].

Анализ проведенных испытаний (рис. 5.1) говорит о росте корсетности пропорционально прогибу вкладышей. Параметр достоверности r^2 показывает, что экспериментальные данные с высокой теснотой связи соответствуют аналитически обоснованным экспоненциальным зависимостям (3.7), (3.13), (3,14), (3.16).

Т а б л и ц а 5.1

Параметры экспоненциальной зависимости показателей технического состояния шатуна от наработки

Показатели	Параметры		
	S_0 , мкм	b , 1/тыс.ч	r^2
Диаметральный износ втулки верхней головки, мкм	2,078	1,539	0,981
Овальность втулки верхней головки, мкм	1,111	1,544	0,926
Диаметральный износ нижней головки, мкм	2,246	1,810	0,915
Остаточный прогиб вкладышей, мкм	1,299	2,136	0,968
Корсетность нижней головки, мкм	1,033	2,117	0,978
Овальность нижней головки, мкм	0,678	2,272	0,960

Данные зависимости необходимы при обосновании ресурсов элементов силового агрегата, по которым формируется структура эксплуатационно-ремонтного цикла (ЭРЦ) двигателя [51].

Структура (ЭРЦ) двигателя КамАЗ-740, при которой ПР проводят при пробеге автомобиля 120 тыс. км, а КР при пробеге автомобиля 200 тыс. км, применительно к III категории условий эксплуатации, была обоснована в работах [122, 124]. При проведении предупредительного ремонта производят замену вкладышей, меняют (по визуальным дефектам – задирам, прижогам) 6% шатунов, восстанавливают – 10% [124]. При капитальном ремонте предусмотрены дефектовка шатунов и практически полное их восстановление. Исследование размеров и формы рабочих поверхностей шатунов показывает, что предельное их состояние наступает при наработке 200 тыс.км (табл. 5.2) [26].

Результаты исследований (табл. 5.2) необходимо учитывать при проведении КР двигателей семейства КамАЗ, особенно при наработке двигателя более 120 тыс. км, где уже наблюдаются изменения формы рабочих поверхностей элементов.

Собранные результаты изменения геометрических параметров (размеров и формы) рабочих поверхностей шеек коленчатых валов и вкладышей силовых агрегатов КамАЗ-Евро дали возможность определить изменения их технического состояния при наработке.

Т а б л и ц а 5.2

Пределные значения показателей технического состояния шатуна, мкм

Показатели технического состояния шатуна	Пределное значение
Диаметральный износ (отклонение) втулки верхней головки	45
Овальность втулки верхней головки	25
Диаметральный износ (отклонение) верхней головки	25
Овальность верхней головки	12
Диаметральный износ (отклонение) нижней головки	100
Овальность нижней головки	60
Корсетность нижней головки	60

Кривые изменения размеров и формы деталей подшипников коленчатого вала частично приведены на рис. 5.2-5.5, а параметры зависимостей показателей технического состояния ПКВ – в табл. 5.3 [26].

В процессе эксплуатации, при изнашивании ресурсопределяющих элементов двигателя, происходит падение давления в системе смазки табл.5.3. С целью прогнозирования остаточного ресурса двигателя рекомендуется учитывать результаты исследуемых параметров при наработке более 50 тыс. км, так как до этого давление в системе смазки не меняется [123].

Параметр детерминации R^2 (табл.5.3), говорит о хорошей сходимости экспериментальных данных с аналитическими зависимостями. Полученные значения критерия Фишера выше табличных, исходя из этого (с доверительной вероятностью 0,95) можно говорить, что изменение исследуемых показателей (износа шеек коленчатого вала и вкладышей) при наработке значимо, а не обусловлены случайными факторами.

Анализ кривых по модификациям двигателей показывает, что интенсивность изменения показателей технического состояния подшипников коленчатых валов в процессе наработки по силовым агрегатам КамАЗ-Евро в среднем в 1,5 раза ниже, чем у КамАЗ-740. Это обуславливает необходимость повышения ресурса подшипников коленчатых валов двигателей КамАЗ-Евро и совершенствование структуры ЭРЦ двигателей [27, 124].

Таблица 5.3

Параметры зависимости показателей технического состояния подшипников коленчатого вала двигателей КамАЗ-Евро от наработки

Показатели технического состояния	Параметры		Критерии	
	S_0	b	R^2	F_p
Износ коренных шеек, мкм	14,98	0,0039	0,954	2,96
Износ шатунных шеек, мкм	9,73	0,0042	0,833	3,41
Износ коренных вкладышей, мкм	24,95	0,0046	0,975	3,92
Износ шатунных вкладышей, мкм	13,40	0,0048	0,986	3,25
Овальность коренных шеек, мкм	5,62	0,0050	0,976	5,11
Овальность шатунных шеек, мкм	4,44	0,0048	0,967	3,27
Зазор в коренных подшипниках, мкм	109,03	0,0025	0,983	3,01
Зазор в шатунных подшипниках, мкм	95,77	0,0025	0,983	2,64
Прогиб шатунных вкладышей, мкм	7,93	0,0069	0,967	4,78
Корсетность нижней головки шатуна, мкм	14,52	0,0062	0,970	3,83
Давление в системе смазки, МПа:				
при 2200 мин ⁻¹ (во всём диапазоне пробега)	0,545	0,0020	0,951	2,18
(при пробеге более 50 тыс.км)	0,547	0,0022	0,976	2,97
при 600 мин ⁻¹	0,256	0,0019	0,861	3,61

R^2 – коэффициент детерминации (параметр достоверности); F_p – расчётное значение критерия Фишера; критическое (табличное) значение критерия Фишера F_p при доверительной вероятности 0,95 и объёме выборки $n = 48$ составляет 2,03, а при $n = 64$ – 1,97.

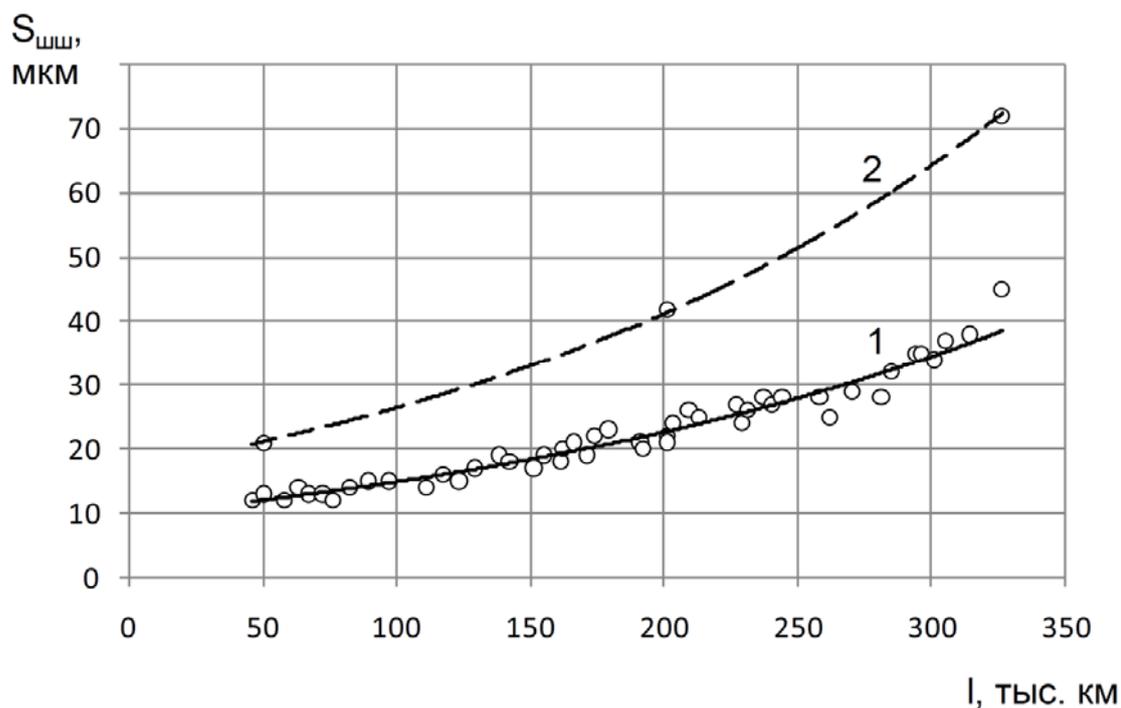


Рис. 5.2. Зависимость износа шатунных вкладышей двигателя КАМАЗ от наработки:
1 – КАМАЗ-Евро; 2 – КАМАЗ-740

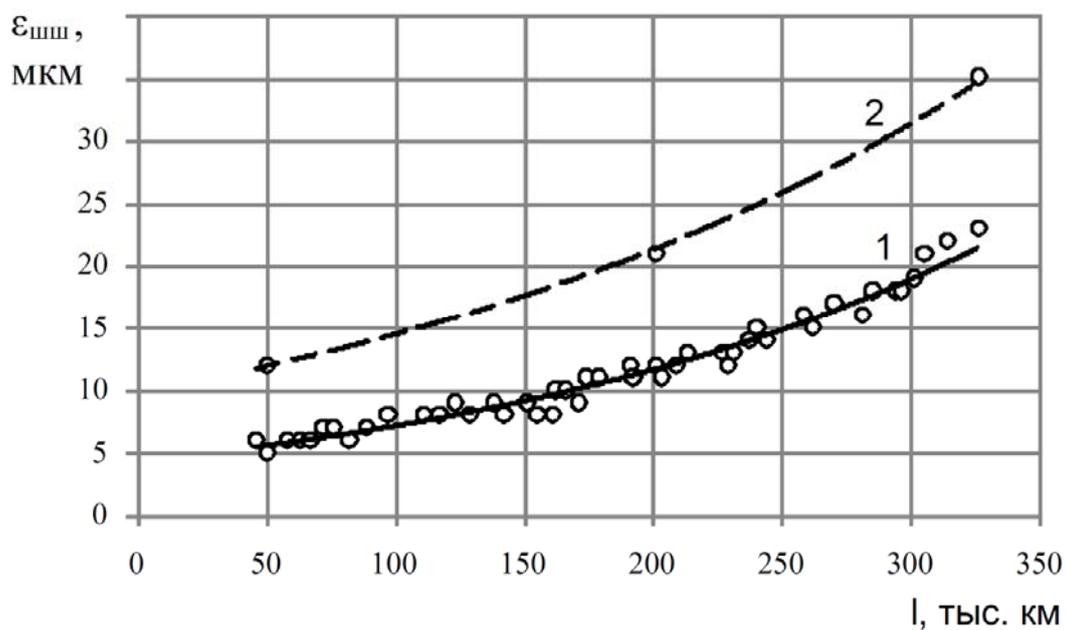


Рис. 5.3. Зависимость овальности шатунных шеек двигателей КАМАЗ от наработки:
1 – КАМАЗ-Евро; 2 – КАМАЗ-740

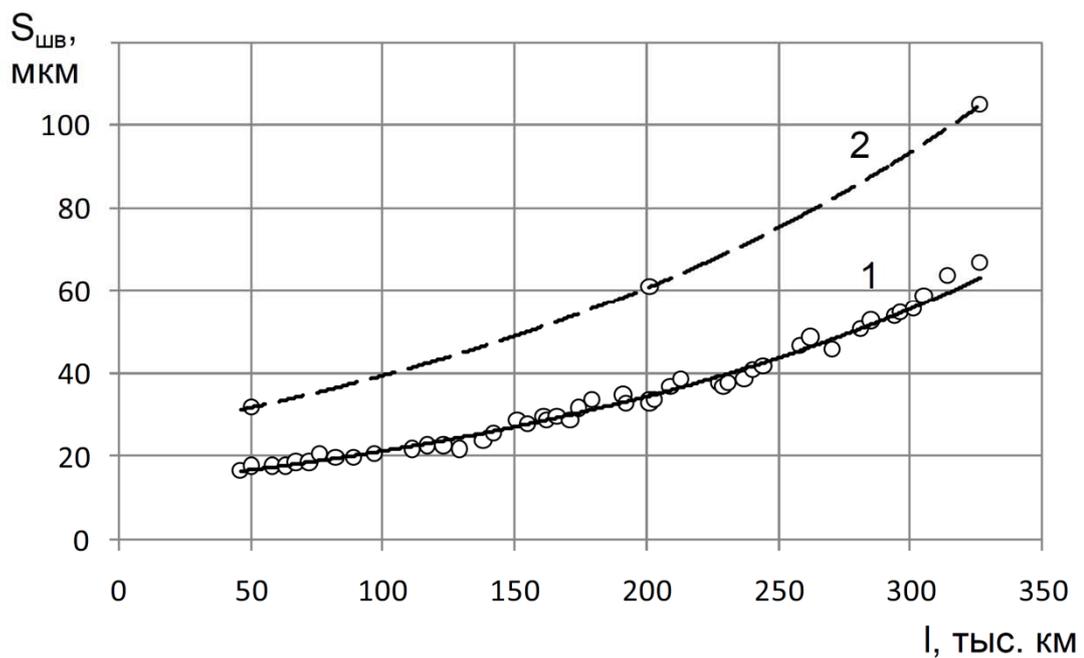


Рис. 5.4. Зависимость износа шатунных вкладышей двигателей КАМАЗ от наработки:
1 – КАМАЗ-Евро; 2 – КАМАЗ-740

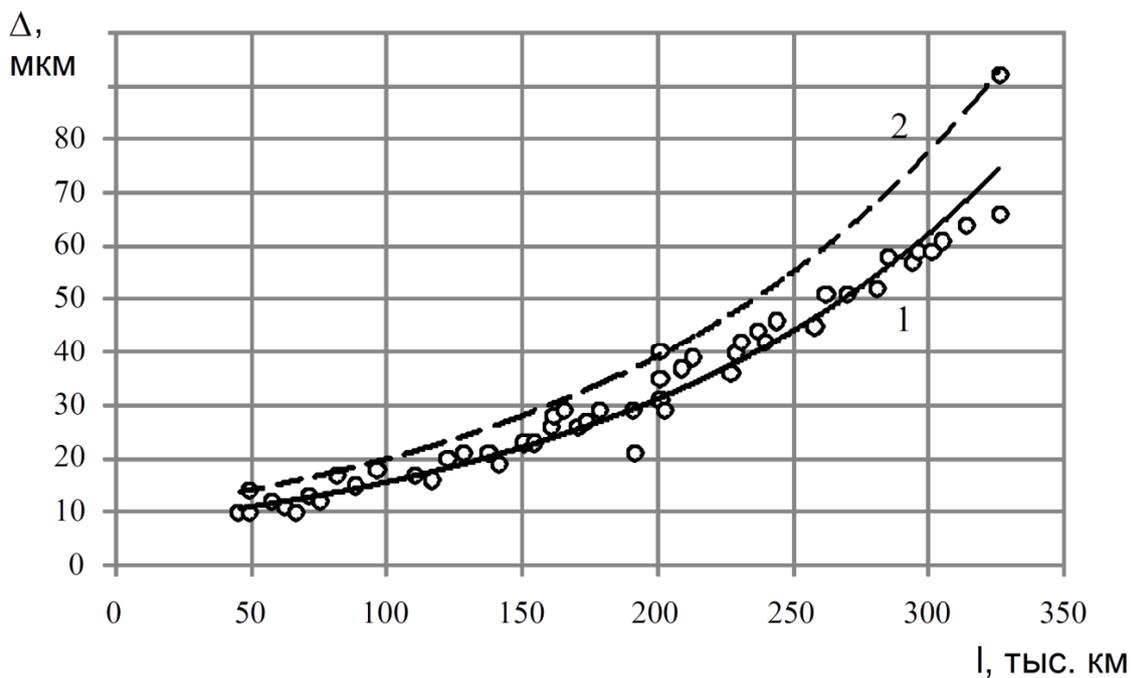


Рис. 5.5. Зависимость остаточного прогиба Δ шатунного вкладыша двигателей КАМАЗ от наработки:
1 – КАМАЗ-Евро; 2 – КАМАЗ-740

Аналогично и по опорам блока цилиндров (рис. 5.6), параметры зависимости показателей технического состояния опор блоков цилиндров КамАЗ от наработки приведены в табл. 5.4. Из графика видно, что предельный износ более 0,02 мм наступает при наработке 150 тыс. км пробега. Из этого следует, что после 150 тыс. км пробега необходимо контролировать износ опор блока цилиндров (постели коленчатого вала), для того чтобы избежать проворачивания коренных вкладышей коленчатого вала.

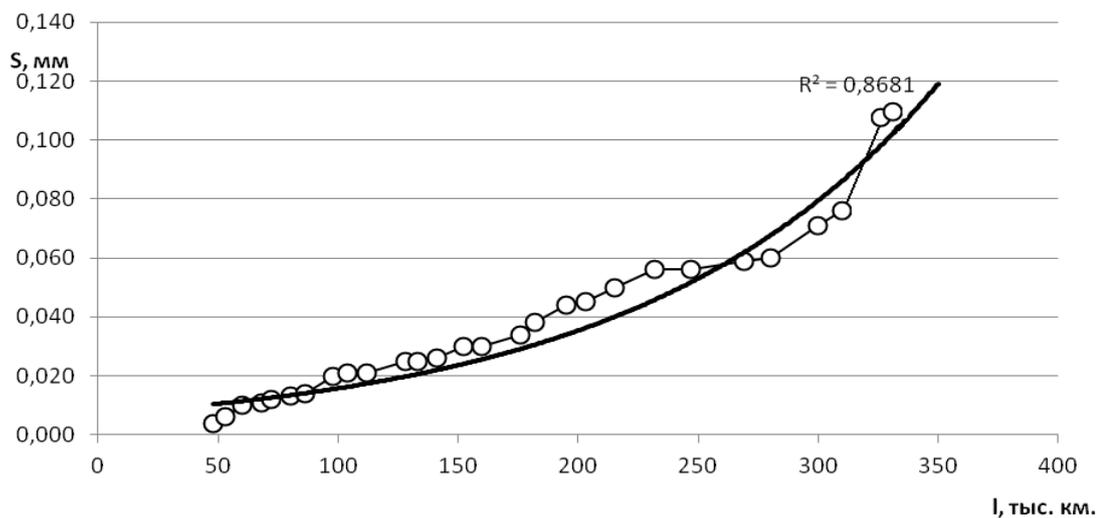


Рис. 5.6. Зависимость износа опор блока цилиндров силовых агрегатов КамАЗ от наработки

Т а б л и ц а . 5.4

Параметры зависимости показателей технического состояния опор блоков цилиндров КамАЗ от наработки

Показатели технического состояния	Параметры		Критерии	
	S_0	b	R^2	F_p
Износ опор блока цилиндров, мкм	8,35	0,0058	0,868	10,24

Собранные результаты экспериментальных исследований по времени вращения ротора турбокомпрессора (выбегу), после остановки двигателя и износу элементов подшипникового узла ТКР-7С (силовых агрегатов КамАЗ-Евро – 64 шт.) определили характер изменения их технического состояния от пробега автомобиля [16].

Результаты замеров износов ротора показаны на рис. 5.7 а изменения времени выбега на рис. 5.8, параметры зависимостей даны в табл. 5.5.

Дисперсионный анализ проводили по критерию Фишера [16].

Параметры зависимости износа и выбега вала ротора турбокомпрессора ТКР–7С от наработки двигателя КамАЗ-Евро

Показатели технического состояния	Параметры		Критерии	
	S_0	b	R^2	F_p
Износ вала ротора, мкм	8,959	0,0222	0,965	4,65
Выбег вала ротора, с	37,85	0,282	0,921	2,92

R^2 – коэффициент детерминации (параметр достоверности); F_p – расчётное значение критерия Фишера; критическое (табличное) значение критерия Фишера F_p при доверительной вероятности 0,95.

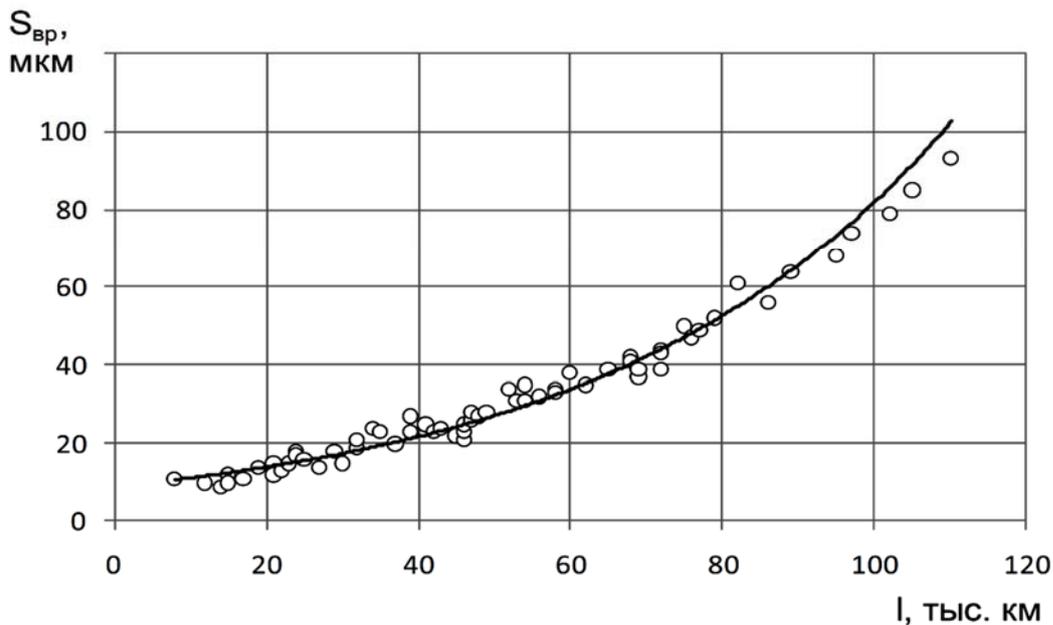


Рис. 5.7. Зависимость износа вала ротора турбокомпрессора ТКР-7С от наработки двигателя КамАЗ-Евро

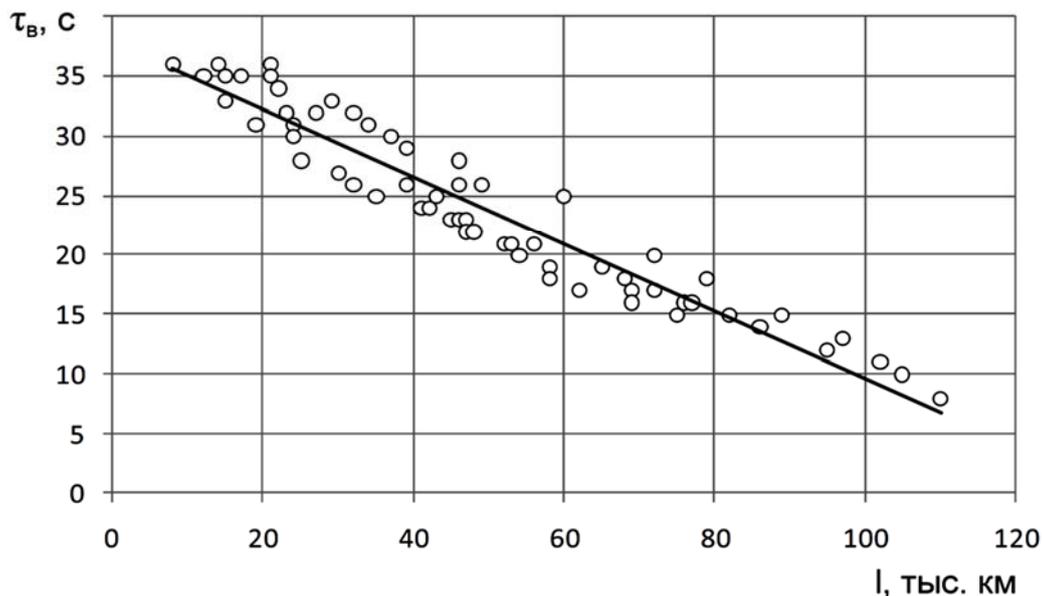


Рис. 5.8. Зависимость выбега вала ротора турбокомпрессора ТКР-7С от наработки двигателя КамАЗ-Евро

Результаты экспериментальных исследований имеют хорошую сходимость с аналитическими зависимостями (3.90), (3.92). Изменение параметров состояния турбокомпрессоров (табл. 5.5) от их наработки значимо, а не обусловлено случайными факторами [16, 145].

5.2. Совершенствование системы смазки турбокомпрессоров двигателей КамАЗ-Евро

Существенным фактором, влияющим на долговечность силового агрегата, является изменение качества масла в двигателе в процессе эксплуатации, в частности содержания присадок в масле и его щелочности.

Закономерности изменения концентрации присадок в масле в процессе эксплуатации основаны на законах химической кинетики. Скорость химической реакции в растворе определяется изменением числа молекул вещества dn в единицу времени dt в единице объёма V :

$$v = \pm \frac{1}{V} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (5.1)$$

Знак «плюс» используют, если скорость определяется по продукту, а «минус» – по исходному веществу.

Скорость реакции зависит от природы реагирующих веществ, их концентрации, температуры и наличия катализатора. Зависимость скорости реакции от концентрации описывается законом действующих масс:

скорость химической реакции в каждый момент времени пропорциональна текущим концентрациям реагирующих веществ C , возведённым в некоторые степени:

$$v = kC_A^x C_B^y, \quad (5.2)$$

где k – константа скорости (не зависящая от концентрации); x, y – некоторые числа, которые называют порядком реакции по веществам A и B , соответственно.

На основе закона действующих масс получена зависимость концентрации исходного вещества от времени:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A. \quad (5.3)$$

Интегрируя это уравнение в пределах от 0 до t , получим:

$$C = C_0 \exp(-kt). \quad (5.4)$$

Время, за которое распадается половина вещества, называется периодом полураспада $t_{1/2}$ и определяется по формуле

$$t_{1/2} = \ln 2 / k. \quad (5.5)$$

Работа автомобильного двигателя оценивается пробегом автомобиля, который при сложившихся условиях эксплуатации прямо пропорционален времени. Поэтому уравнения (5.3) и (5.4) с использованием пробега l примут вид:

$$-\frac{dC_A}{dl} = kC_A, \quad (5.6)$$

$$C = C_0 \exp(-kl). \quad (5.7)$$

Схематично зависимость (5.7) приведена на рис. 5.9.

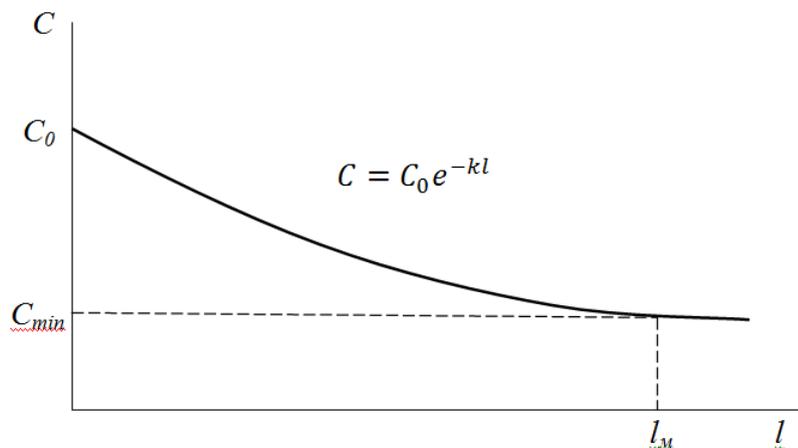


Рис. 5.9. Закономерность изменения щёлочности моторного масла в процессе работы без долива

Однако эти уравнения справедливы при постоянном объёме масла в смазочной системе. В процессе эксплуатации автомобиля повышается расход масла на угар, предельное значение которого составляет 2-2,5 % [27]. Так, для автомобиля КамАЗ-6520 с двигателем КамАЗ-740.51-320 расход топлива составляет 39 л/100 км. При месячном пробеге 4,5-5 тыс. км (по отчётным данным) расход масла на угар составит 35-48 л. Даже если принять средний расход масла на угар в два раза меньше предельного, то расход масла в месяц составит 17-24 л, что соизмеримо с объёмом смазочной системы.

Поэтому при составлении исходного дифференциального уравнения расхода щелочной присадки в процессе работы необходимо учитывать параметры долива масла. В процессе эксплуатации двигателя с постоянным количеством масла G в масляной системе (при доливе масла, равном его угару) количество щелочной присадки c зависит от исходного c_0 количества, интенсивности расхода α_c щелочной присадки, отнесённой ко всему количеству масла в системе в долях единицы c , на нейтрализацию продуктов окисления, интенсивности угара Q_y и долива Q_d масла [58].

За пробег dl количество щелочной присадки уменьшается на dc в единице объёма масла или Gdc во всём объёме. Такое уменьшение произойдёт из-за расхода щелочной присадки на нейтрализацию продуктов окисления за этот пробег $\alpha_c c dl$, потери щелочной присадки со сгоревшим маслом $Q_y c dl$ и поступления щелочной присадки при доливе масла $Q_d c dl$; поскольку $Q_y = Q_d = Q$:

$$Gdc = \alpha_c c dl + c_0 Q dl. \quad (5.8)$$

Интенсивность, долю α_c расхода единицы щелочной присадки за единицу пробега на нейтрализацию продуктов окисления принимают пропорциональной содержанию серы в топливе и расходу топлива.

После математических преобразований и решения уравнения вначале относительно l получают затем зависимость щёлочности c от пробега l :

$$c = \frac{c_0 \left(Q + \alpha_c e^{-\frac{(Q+\alpha_c)l}{G}} \right)}{Q + \alpha_c}. \quad (5.9)$$

При снижении щёлочности ниже значения c_n увеличивается коррозионный износ из-за неполной нейтрализации кислот. Поэтому если уровень первоначальной щёлочности c_0 большой, а $c > c_n$ при значительном пробеге, то срок замены масла определяется накоплением загрязнений.

Схематично процесс изменения щёлочности при доливе масла показан на рис. 5.10.

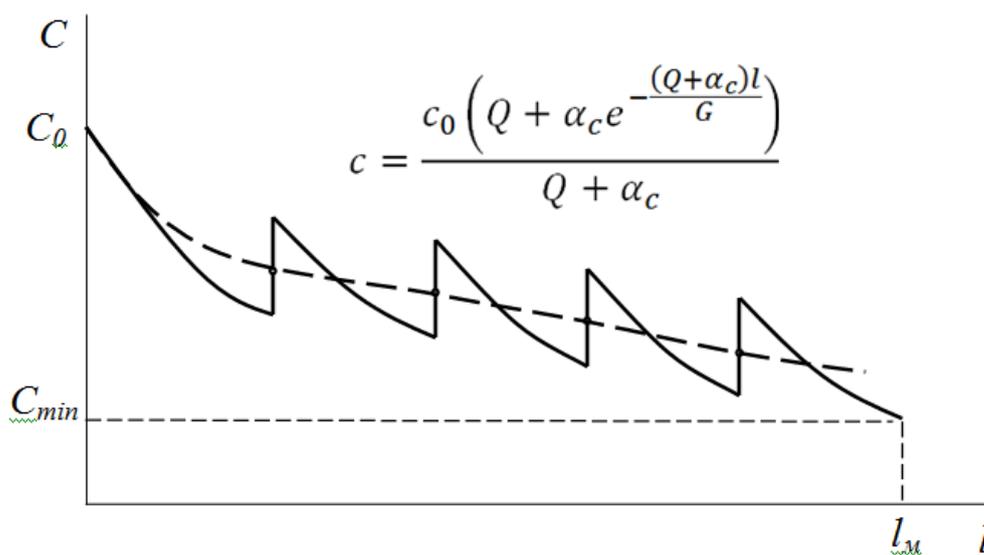


Рис. 5.10. Закономерность изменения щёлочности моторного масла в процессе работы с доливом

В процессе форсирования двигателей, в том числе с использованием турбонаддува, существенно повышается температура деталей, что не учтено в дифференциальном уравнении (5.8). Скорость большинства реакций увеличивается с ростом температуры (термоактивируемые процессы). Для количественного описания температурных эффектов в химической кинетике используются два основных соотношения – правило Вант-Гоффа и уравнение Аррениуса.

Правило Вант-Гоффа заключается в том, что при нагревании 10°C скорость большинства химических реакций увеличивается в 2-4 раза. Это правило является приближённым, поэтому чаще используют уравнение Аррениуса:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (5.10)$$

где R – универсальная газовая постоянная; A – множитель, определяемый природой реакции; E_a – энергия активации; T – абсолютная температура, К.

Если в малофорсированных двигателях температура деталей по мере отложений продуктов окисления масла возрастала на 5-7°C [27], то в форсированных турбонаддувом дизелях – на 20-30 °C. Это необходимо учитывать при составлении следующего дифференциального уравнения:

$$Gdc = -(\alpha_{co} + bl)C - CQdl + C_0Qdl. \quad (5.11)$$

Решение уравнения с помощью программного средства «Matlab 6.5» [319] позволило получить следующее уравнение в общем виде

$$C = -\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\left(\frac{\pi b}{G}\right)} C_0 Q \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{-2\frac{b}{C_m}}}{2} l - \frac{2\alpha_{co} + 2Q}{2G \sqrt{-2\frac{b}{C_m}}} \right) \frac{\exp\left(-\frac{b(2\alpha_{co} + bl + 2Q)}{2G} - \frac{(2\alpha_{co} + 2Q)^2}{8Gb}\right)}{b} + \exp\left(-\frac{b(2\alpha_{co} + bl + 2Q)}{2G}\right) C_1 \quad (5.12)$$

При начальных условиях: $l=0$, $C=C_0$ получим следующее выражение:

$$C = -\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\left(\frac{\pi b}{G}\right)} C_0 Q \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{-2\frac{b}{C_m}}}{2} l - \frac{2\alpha_{co} + 2Q}{2G \sqrt{-2\frac{b}{C_m}}} \right) \frac{\exp\left(-\frac{b(2\alpha_{co} + bl + 2Q)}{2G} - \frac{(2\alpha_{co} + 2Q)^2}{8Gb}\right)}{b} + \exp\left(-\frac{b(2\alpha_{co} + bl + 2Q)}{2G}\right) C_0 \quad (5.13)$$

$$\frac{\left(-\exp\left(-\frac{\alpha_{co}Q}{Gb}\right) \sqrt{2} \sqrt{\frac{\pi b}{G}} Q \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha_{co} + Q}{G \sqrt{-2\frac{b}{G}}} \right) \exp\left(-\left(\frac{\alpha_{co}^2 + Q^2}{2Gb}\right) + 2b\right) \right)}{\exp\left(-\frac{\alpha_{co}Q}{Gb}\right) \exp\left(\frac{\alpha_{co}Q}{Gb}\right) b}$$

Видим, что в уравнение входит функция erf , которая имеет характер кумулятивной кривой. Это свидетельствует о наличии точки перегиба в функции щёлочности от наработки. То есть, с начала работы свежего масла резко снижается его щёлочность, но скорость реакции снижается и стабилизируется. Затем вследствие роста температуры деталей из-за

отложенной скорости реакции возрастает. Схематично это представлено на рис. 5.11.

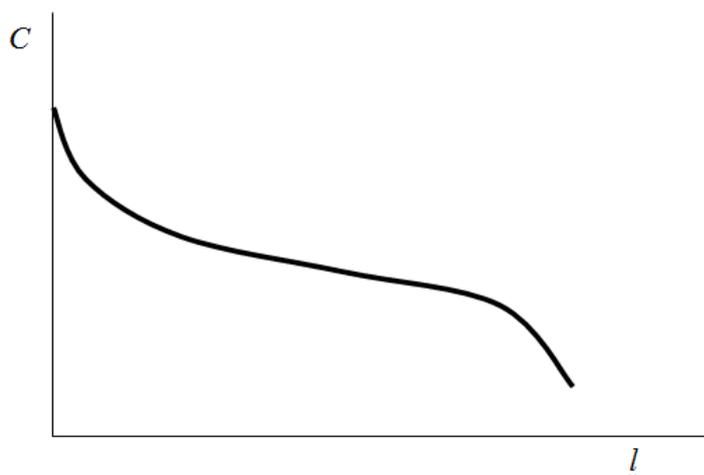


Рис. 5.11. Закономерность изменения щёлочности моторного масла в процессе работы с доливом и с учётом влияния температуры деталей

Как видно из выражения (5.13), оно имеет сложный характер, хотя и получено с учётом допущений. Поэтому для практического прогнозирования щёлочности моторного масла в процессе работы это уравнение целесообразно аппроксимировать полиномом третьей степени, имеющим точку перегиба, как и исходное уравнение

$$y = a + bl + cl^2 + dl^3, \quad (5.14)$$

где a , b , c , d – параметры кривой, определяемые по экспериментальным данным методом наименьших квадратов.

Накопление в масле в процессе работы асфальтосмолистых компонентов вызывает повышение его вязкости. Однако вследствие неудовлетворительной работы топливной аппаратуры дизелей, особенно на частичных режимах, часть топлива не сгорает, а попадает в картер двигателя. Вследствие этого вязкость масла снижается в процессе работы.

Собранные экспериментальные данные по изменению показателей моторного масла автомобилей КамАЗ-Евро представлены на рис. 5.12 -5.15 и в табл. 5.6.

Для форсированных автотракторных двигателей характерно снижение вязкости масла в процессе работы. Это обусловлено ухудшением состояния топливной аппаратуры. За наработку 16-20 тыс. км, то есть до замены масла, давление впрыска топлива форсунками снижается на 15-20 % [27], что существенно ухудшает качество распыливания и испаряемость. При этом всё большая доля топлива не сгорает, а попадает в картер и разжижает масло.

Поэтому тенденцию снижения вязкости моторного масла в процессе работы можно принять аналогичной тенденции снижения щёлочности, то есть использовать уравнение (5.14), рис. 5.12.

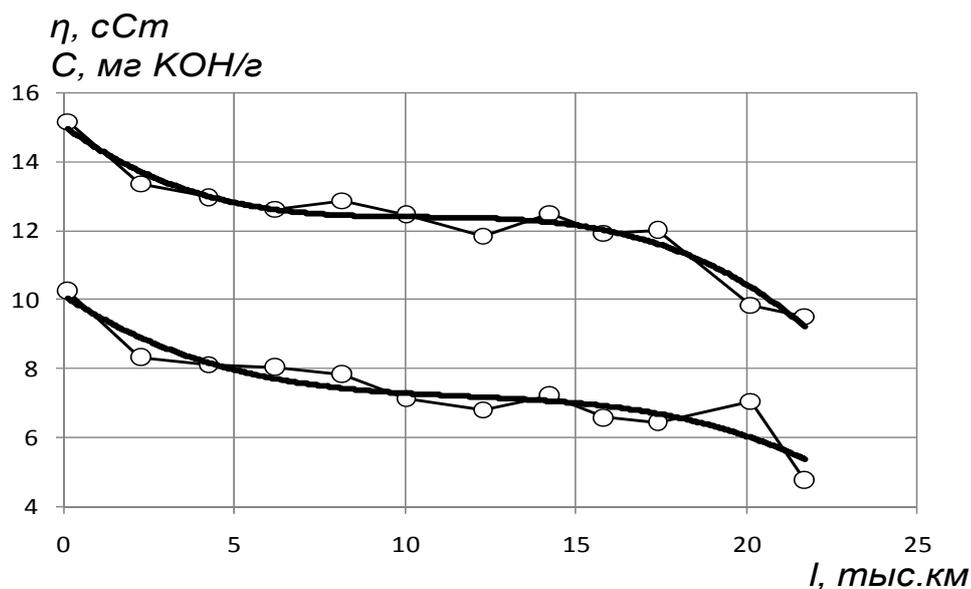


Рис. 5.12. Изменение щёлочности C и вязкости η в процессе работы моторного масла по автомобилям КамАЗ-Евро

Справедливость такого механизма снижения вязкости моторного масла в процессе работы подтверждается и снижением температуры вспышки (рис. 5.13). Это свидетельствует об увеличении доли лёгких (топливных) фракций в масле. Тенденцию изменения этого показателя в процессе работы масла также можно описать уравнением (5.14).

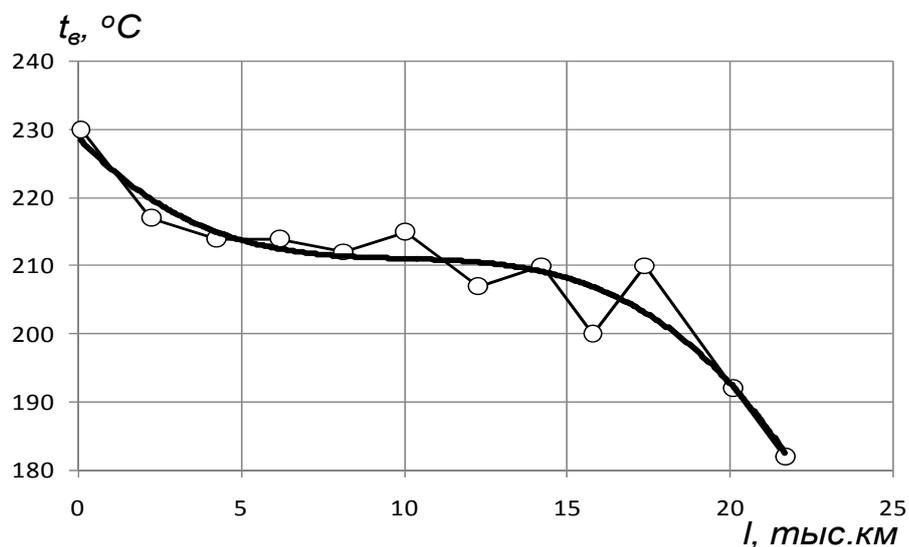


Рис. 5.13. Изменение температуры вспышки t_g в процессе работы моторного масла по автомобилям КамАЗ-Евро

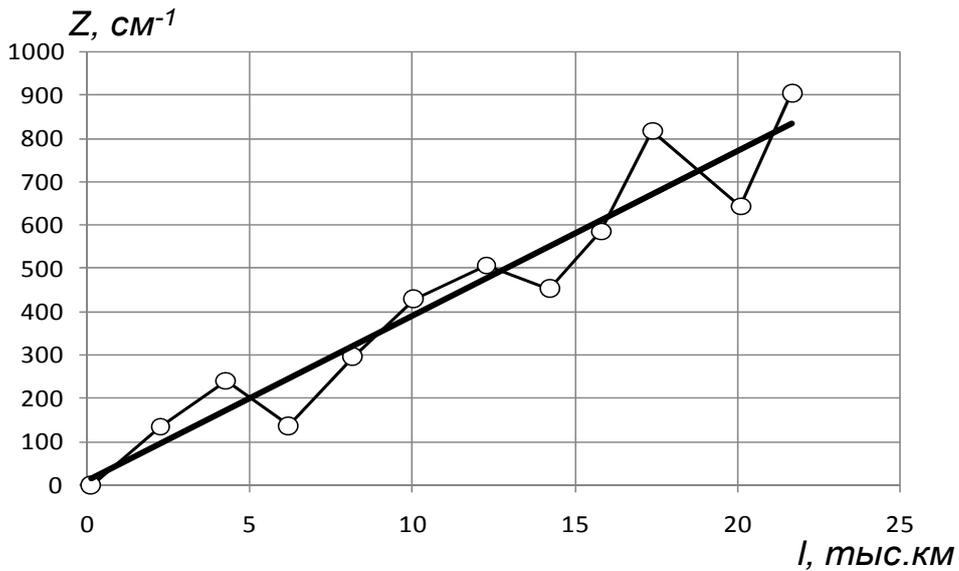


Рис. 5.14. Изменение загрязнённости Z в процессе работы моторного масла по автомобилям КамАЗ-Евро

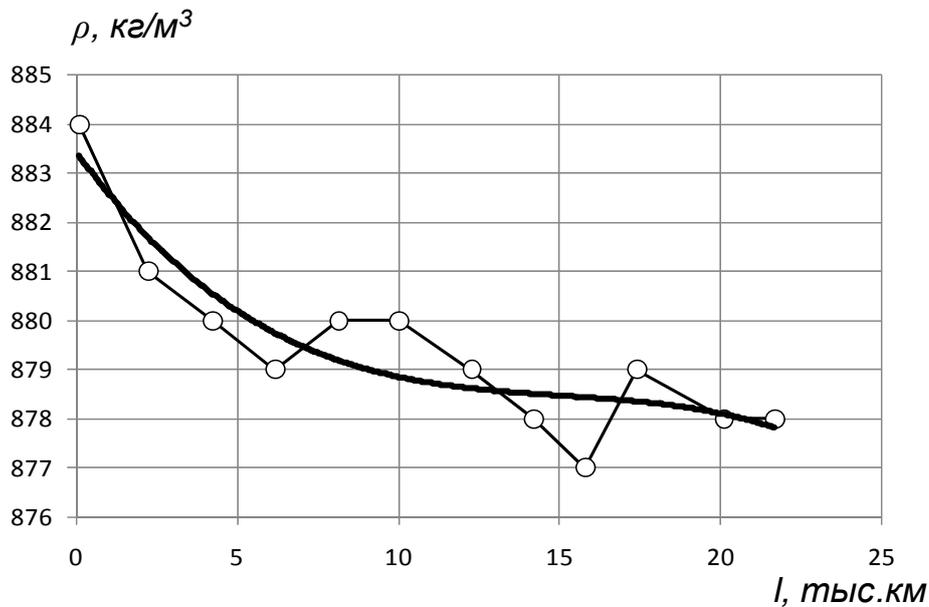


Рис. 5.15. Изменение плотности ρ в процессе работы моторного масла по автомобилям КамАЗ-Евро

Таблица 5.6

Параметры зависимости показателей состояния моторного масла от наработки

Показатели состояния	a	b	c	d	R^2
η , сСт	15,02	-0,703	0,068	-0,002	0,95
C , мг КОН/г	10,08	-0,646	0,050	-0,001	0,873
t_b , °С	228,9	-5,091	0,496	-0,016	0,919
Z , см ⁻¹	10,14	37,97	-	-	0,914
ρ , кг/м ³	883,4	-0,902	0,056	-0,001	0,820

η – кинематическая вязкость, сСт; C – щёлочность, мг КОН/г; t_b – температура вспышки, °С; Z – загрязнённость, см⁻¹; ρ – плотность, кг/м³.

Как видно из табл. 5.6, судя по параметру детерминации R^2 , все показатели с высокой сходимостью соответствуют аналитическим зависимостям.

Таким образом, изменение показателей состояния моторного масла в процессе работы форсированных двигателей характеризуется тремя фазами вследствие роста температуры из-за отложений на деталях. Это особенно обуславливает срок замены моторного масла. Для повышения срока службы масла, долговечности турбокомпрессоров и всего силового агрегата в целом целесообразно снизить теплонапряженность подшипникового узла ТКР.

Это возможно использованием автономной системы смазки ТКР.

В существующей системе смазки автомобилей КамАЗ (рис.5.16) турбокомпрессор является наиболее удаленным элементом смазки, данная схема применяется также на ЯМЗ– 240, СМД-60 и большинстве дизелей иностранного изготовления [16].

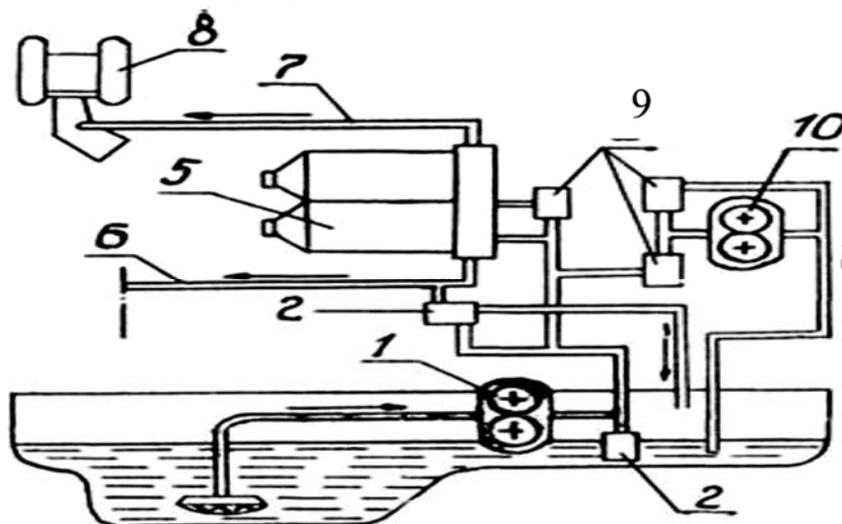


Рис. 5.16. Схема системы смазки дизелей с турбонаддувом с полнопоточной системой фильтрации:

- 1 – масляный насос; 2 – клапаны в системе смазки; 3 – фильтр грубой очистки;
- 4 – фильтр центробежной очистки; 5 – полнопоточный фильтр; 6 – главная магистраль;
- 7 – маслоподводящие трубопроводы; 8 – турбокомпрессор; 9 – масляный насос

Для обеспечения условий гидродинамической смазки в подшипниковом узле ТКР необходимо, чтобы расход масла в подшипниковом узле был 0,2 л/мин, а давление не менее 0,1 МПа [16].

При недостаточной подаче масла и высокой частоте вращения вала ротора (до 100 тыс. об/мин) теряется устойчивость масляного слоя в узле подшипников и возрастает амплитуда прецессионного движения вала ротора, что приводит к износам и уменьшению частоты его вращения. На подшипники турбокомпрессора воздействуют дополнительные нагрузки, обусловленные значительным уменьшением вязкости масла в связи с

возрастанием температуры и ростом амплитуды прецессирования вала ротора, что приводит к касанию поверхностей трения. При осмотре деталей узла подшипников отмечается осветление участков контакта (натир). Последовательное накопление натиров и рисок приводит к качественным изменениям в работе сопряженных поверхностей узла подшипников и, в конечном итоге, выходу ТКР из строя.

Таким образом, на долговечность турбокомпрессора существенное влияние оказывает система смазки подшипников ТКР.

Для повышения надежности работы системы смазки турбокомпрессора предложена система смазки, отличная от существующих систем смазки турбокомпрессоров двигателей внутреннего сгорания (патент № 93462) (рис. 5.17).

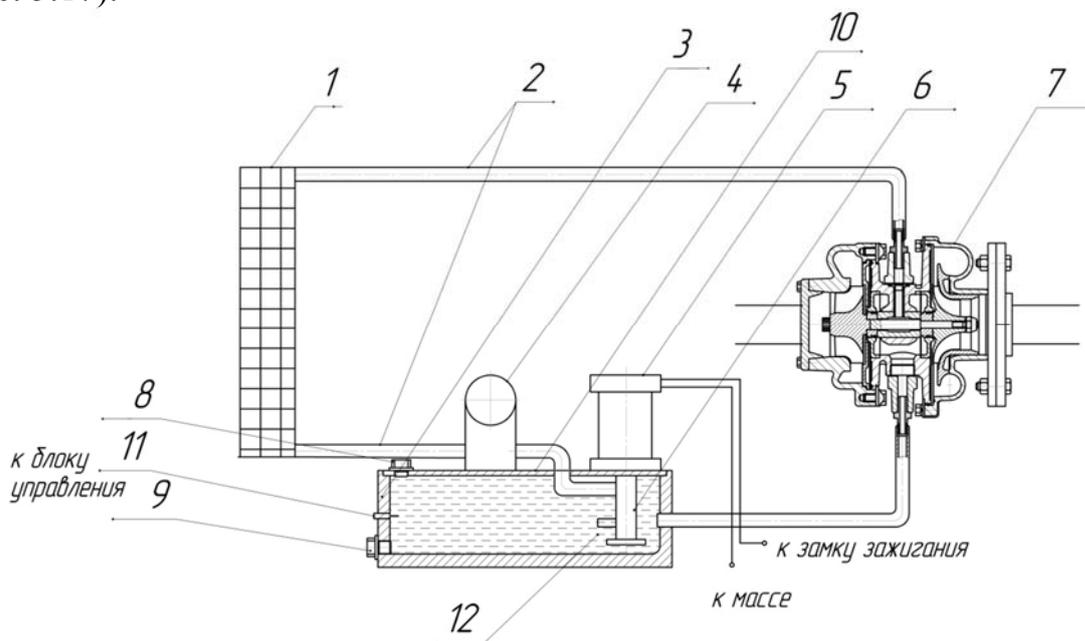


Рис. 5.17. Автономная система смазки турбокомпрессора

Устройство (рис. 5.17) содержит масляный радиатор 1 для охлаждения температуры масла в системе, масляные трубопроводы 2, масляный бак 3, заполненный маслом, масляный фильтр 4, предусмотренный в системе для очистки масла от загрязнений, появляющихся в процессе эксплуатации, электродвигатель 5 постоянного тока, шестеренчатый масляный насос 6, приводимый во вращение от электродвигателя постоянного тока с рабочим напряжением 24 В, турбокомпрессор двигателя внутреннего сгорания 7, заливную 8 и сливную 9 пробки, верхнюю крышку масляной емкости 10, на которой закреплен масляный фильтр тонкой очистки, в стенке бака имеется датчик температуры масла 11, перепускной клапан 12. Объем масла в баке 3 выбирается из условия обеспечения подачи масла для безаварийной работы турбокомпрессора, данное требование обеспечивает объем масла 5 литров.

Сущность технического решения заключается в необходимости смазывать трущиеся поверхности турбокомпрессора перед запуском двигателя, за

счет создания давления в системе смазки посредством масляного насоса 6, вращаемого от электродвигателя 5, на который подается напряжение при повороте ключа зажигания, при незапущенном двигателе автомобиля, тем самым обеспечивать нормальную работу сопряжений в предпусковой момент, в процессе работы и после остановки двигателя внутреннего сгорания. После остановки двигателя внутреннего сгорания вращающиеся по инерции детали турбины будут смазываться маслом до тех пор, пока не отключится турботаймер и на электродвигатель 5 перестанет поступать напряжение.

Поскольку система полностью автономна, то данное техническое решение позволяет применять для системы смазки турбокомпрессора специальные турбинные масла синтетического происхождения, не склонные к коксованию, имеющие более высокую устойчивость при работе с высокими температурами и приспособляемость к меняющимся в процессе эксплуатации условиям работы, что позволяет снизить теплонапряженность деталей и повышает долговечность работы турбокомпрессора и всего агрегата в целом.

Автономная система смазки позволяет избавиться от указанных недостатков, обеспечивая смазку трущихся поверхностей деталей турбокомпрессора перед запуском двигателя, во время работы и при его полной остановке.

Разработанная и изготовленная автономная система смазки турбокомпрессоров прошла испытания на заводе двигателей ОАО «КАМАЗ», по методике, изложенной во второй главе. Для оценки исследуемых параметров фиксировали параметры работы турбокомпрессора со штатной и автономной системами смазки. Результаты испытаний представлены в табл. 5.7-5.8.

Т а б л и ц а 5.7

Параметры работы ТКР со штатной и автономной системами смазки при $n=600\text{мин}^{-1}$

Параметры		№ опыта		
		1	2	3
Время выбега вала ротора τ , с	Штатная	19	16	16
	Автономная	7	6	7
Давление масла P , МПа (кгс/см ²)	Штатная	0,4 (4)	0,4 (4)	0,4 (4)
	Автономная	0,35 (3,5)	0,35 (3,5)	0,35 (3,5)
Температура масла до подшипникового узла t , °С	Штатная	76	77	77
	Автономная	24	25	25
Температура масла после подшипникового узла t , °С	Штатная	84	85	84
	Автономная	36	38	37
Температура корпуса улитки, t , °С	Штатная	290	295	296
	Автономная	282	288	287

Таблица 5.8

Параметры работы ТКР со штатной и автономной системами смазки
при $n=1300 \text{ мин}^{-1}$

Параметры		№ опыта		
		1	2	3
Время выбега вала ротора τ , с	Штатная	23	25	25
	Автономная	8	8	7
Давление масла P , МПа (кгс/см ²)	Штатная	0,4 (4)	0,4 (4)	0,4 (4)
	Автономная	0,35 (3,5)	0,35 (3,5)	0,35 (3,5)
Температура масла до подшипникового узла t , °С	Штатная	75	75	77
	Автономная	26	26	27
Температура масла после подшипникового узла t , °С	Штатная	82	81	82
	Автономная	37	38	38
Температура корпуса улитки, t , °С	Штатная	322	325	321
	Автономная	315	317	317

Применение автономной системы смазки турбокомпрессора позволяет обеспечить температурный режим в подшипниковом узле турбокомпрессора, не превышающий предельных значений 95-100 °С на всех режимах работы двигателя и избежать теплового удара в подшипниковом узле турбокомпрессора после остановки двигателя.

С учетом полученных при испытаниях результатов завод допускает использование автономной системы смазки турбокомпрессоров на автомобилях семейства КамАЗ в эксплуатирующихся предприятиях в послегарантийный период эксплуатации.

5. 3. Технологии восстановления деталей электролитическим железным покрытием

5.3.1. Совершенствование технологии восстановления шатунов двигателей КамАЗ

Условия работы шатуна, действующие на него нагрузки, изменения его технического состояния определяют метод его восстановления. Этапы технологического процесса восстановления шатуна представлены на рис. 5.18 [25, 26].

Выбор маршрута технологического процесса восстановления определяется дефектовочной операцией, которая проводится в соответствии с картой дефектации шатуна и ремонтным чертежом (рис. 5.19) [26].

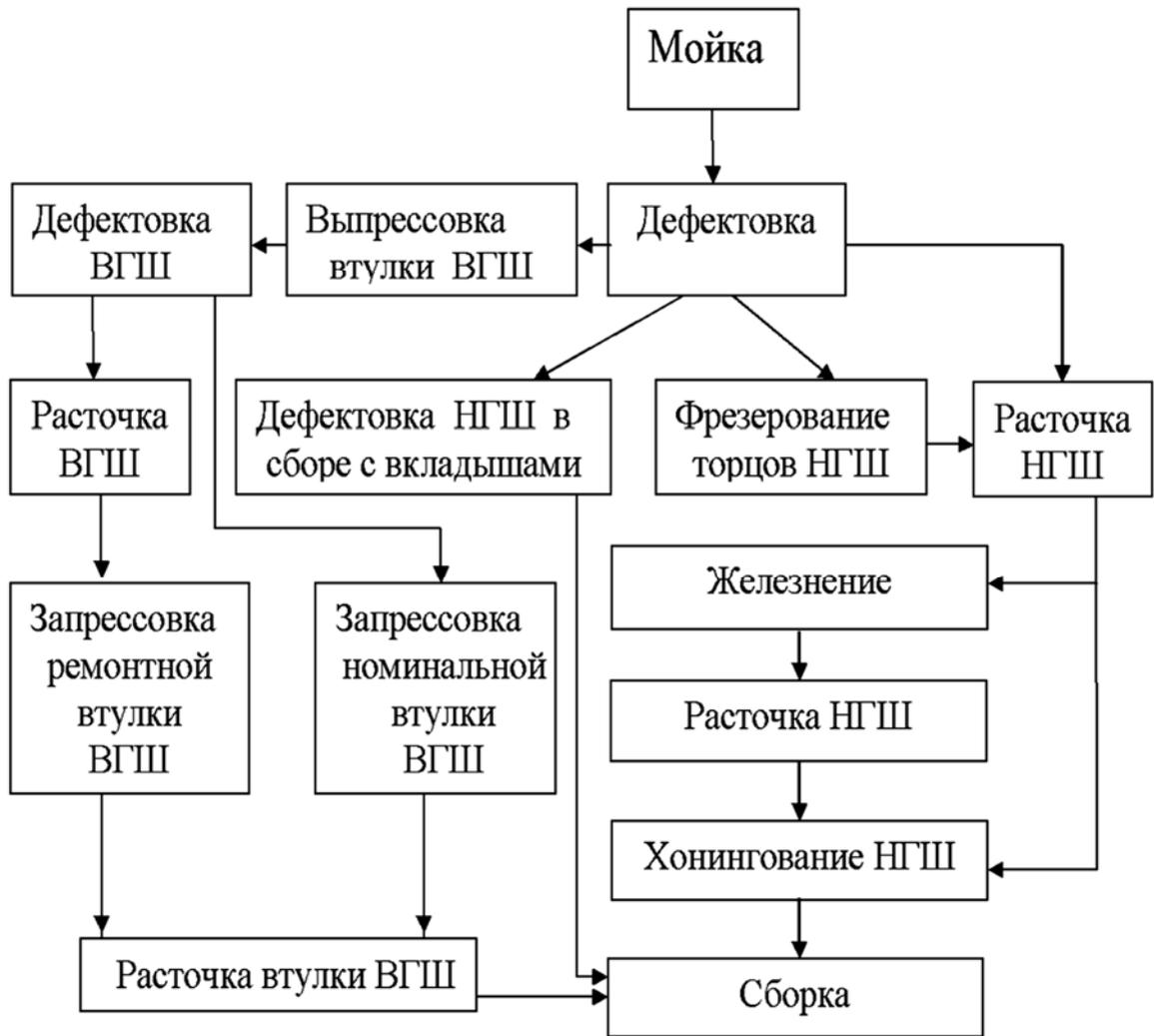


Рис. 5.18. Схема технологического процесса восстановления шатуна

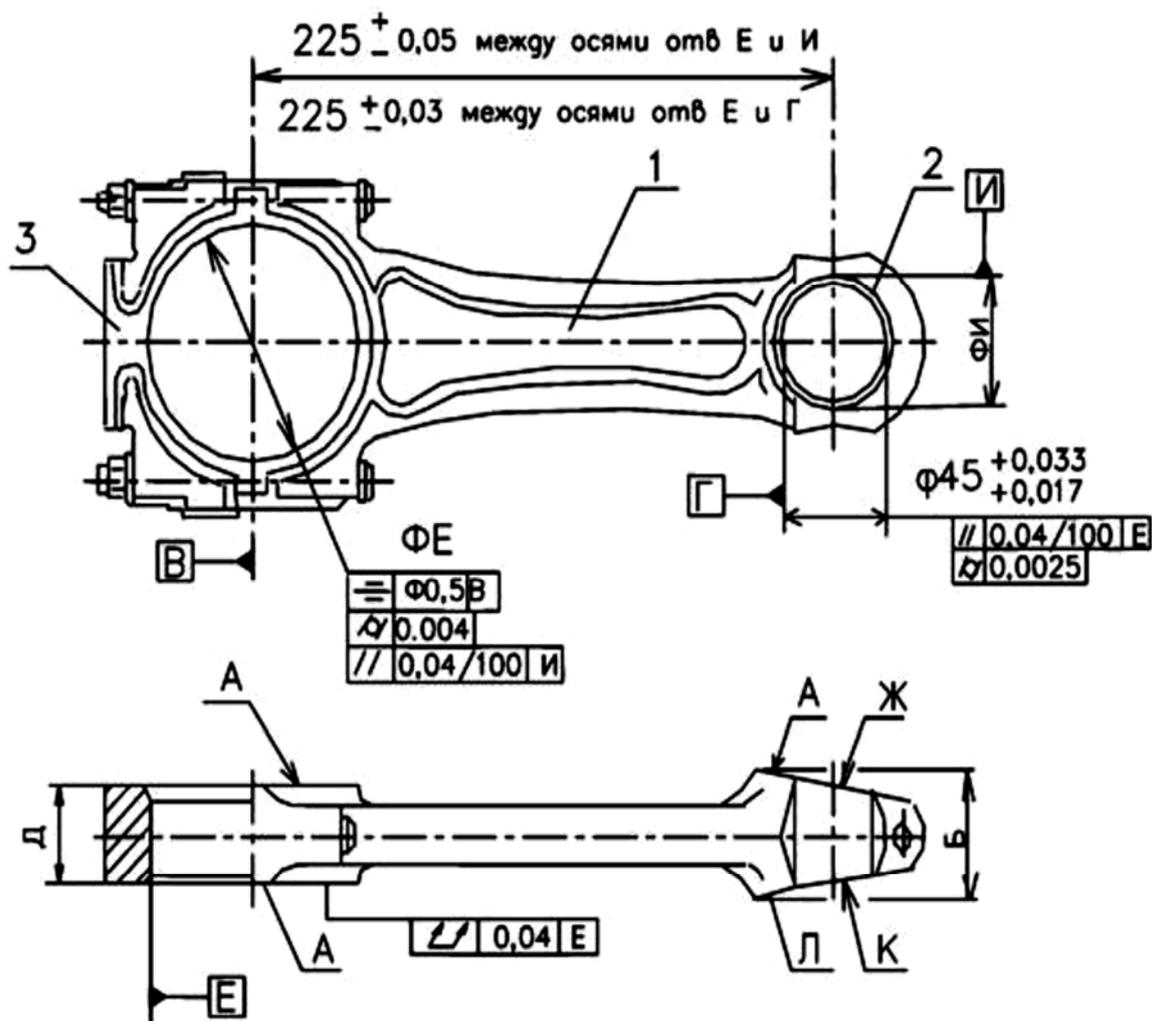


Рис. 5.19. Ремонтный чертеж шатуна в сборе:

1 – корпус; 2 – втулка; 3 – крышка шатуна

Из схемы технологического процесса восстановления шатуна (рис. 5.18) следуют три варианта (маршрута) восстановления верхней головки шатуна (ВГШ) и три варианта восстановления нижней головки шатуна (НГШ). Рассмотрим их подробнее [26].

Верхняя головка шатуна:

1. Втулки ВГШ в допуске (табл. 5.6): дефектовка НГШ и далее по схеме (рис. 5.18).

2. Втулка ВГШ вне допуска (табл. 5.6): выпрессовки втулки; дефектовка ВГШ; если отклонения поверхности И (рис. 5.19) менее 0,02 мм, то запрессовка втулки номинального размера и далее по схеме (рис. 5.18).

3. Втулка ВГШ вне допуска (табл. 5.6): выпрессовки втулки; дефектовка ВГШ; если отклонения поверхности И (рис. 5.19) более 0,02 мм, то расточка ВГШ до ремонтного размера и запрессовка втулки ремонтного размера и далее по схеме (рис. 5.18).

Нижняя головка шатуна:

1. НГШ в допуске (табл.5.6): дефектовка НГШ в сборе с вкладышами и далее по схеме (рис. 5.18).

2. НГШ имеет отклонения поверхности Е (рис. 5.19) в пределах 0,02-0,04 мм: фрезерование торцов НГШ и далее по схеме (рис. 5.18).

3. НГШ имеет отклонения поверхности Е (рис. 5.19) более 0,4 мм: расточка НГШ, железнение и далее по схеме (рис. 5.18).

Ремонт шатуна начинают с проверки изгиба и скручивания на контрольном приспособлении с индикаторной головкой часового типа (патент №68755). При непараллельности осей отверстий верхней и нижней головок шатуна свыше 0,06 на длине 100 мм при отклонении этих же осей свыше 0,12 на длине 100 мм – шатун правят.

В случае ослабления посадки втулки верхней головки шатуна по отверстию И заменяют втулку. Изношенную втулку выпрессовывают, новую втулку из бронзы БрОС-10-10 охлаждают в жидком азоте и запрессовывают так, чтобы не допустить ее выступание за поверхности Ж и К. При износе более 49,02 мм отверстие верхней головки шатуна растачивают до Ø 49,5 Н6 и запрессовывают ремонтную втулку Ø 49,5 р6, как указано выше. Другой способ: восстанавливают поверхность И железнением, затем растачивают до номинального размера.

При износе отверстия втулки верхней головки шатуна Г более допустимого размера Ø 45,04 мм втулки заменяют новыми. Отверстия новых втулок растачивают до номинального размера Ø 44,98^{+0.02} мм и затем хонингуют, используя синтетические алмазные хонинговальные бруски 45x3x3x22 марки А М40/28м73 СТ СЭВ 204-75. Обработку выполняют до номинального размера Ø45^{+0.033}_{+0.017}, выдерживая указанное на рис. 5.19 расстояние между осями верхней и нижней головок шатуна. Из-за проворачивания шатунных вкладышей и наличия только одного ремонтного размера 0,5 мм для снижения коэффициента сменности разработана и внедрена технология углубленного ремонта шатуна, которая введена в КД и в применение.

В случае деформации или износа отверстия нижней головки шатуна более допустимого размера Е поверхность восстанавливают железнением. После железнения шлифуют отверстия на внутришлифовальном станке, используя шлифовальный круг ПВ 70x60x20 марки 24А32ПМ36К5А (ГОСТ2424-83). Обработывают отверстия размером Ø85^{+0.016}_{-0.005} мм, а затем хонингуют до Ø85^{+0.022} мм брусками из синтетических алмазов марок АМ28М1 и АМ40М1 на вертикально-хонинговальном станке, используя в качестве СОЖ смесь из 70% керосина и 30 % веретенного масла. После хонингования шатуны последовательно промывают в керосине и горячей воде, продувают сжатым воздухом (сушат).

Другой способ восстановления шатуна по отверстию нижней головки – расточка на категорийный размер $\text{Ø}85,5^{+0.016}_{-0.005}$ с установкой вкладышей ремонтного размера.

Третий способ – фрезерование плоскости разъема шатуна и крышки на 0,25 мм. Обработку выполняют в приспособлении с гидрозажимом (рис. 5.20).

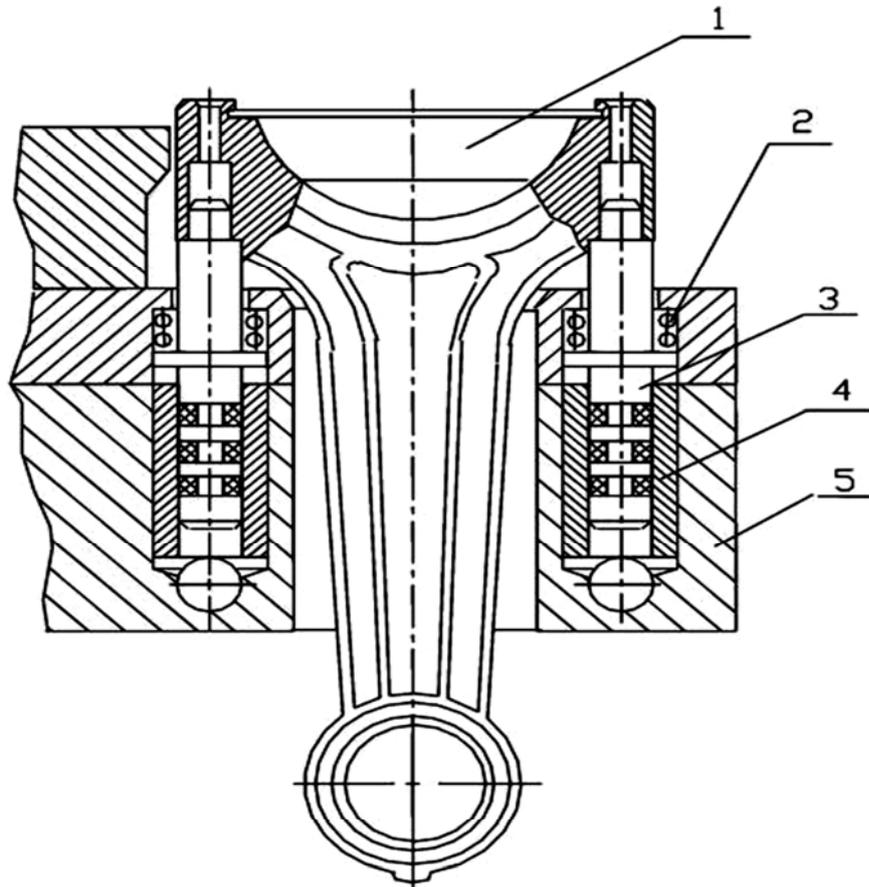


Рис. 5.20. Приспособление с гидрозажимом для фрезерования плоскостей разъема шатунов и крышек:

1 – сектор; 2 – пружина; 3 – плунжер; 4 – втулка; 5 – корпус

После обработки шатун собирают, растачивают и хонингуют отверстие нижней головки шатуна до номинального размера. Недостаток этой технологии – изменение межосевого расстояния между отверстиями Е и И. Кроме того, на участках поверхности отверстия нижней головки, прилегающих к плоскости разъема, при расточке остаются черновины.

Технологический процесс электролитического железнения позволяет формировать покрытия на восстанавливаемых поверхностях деталей высокой твердости и износостойкости. Наиболее приемлемыми являются два варианта технологического процесса твердого железнения (рис. 5.21) [26].

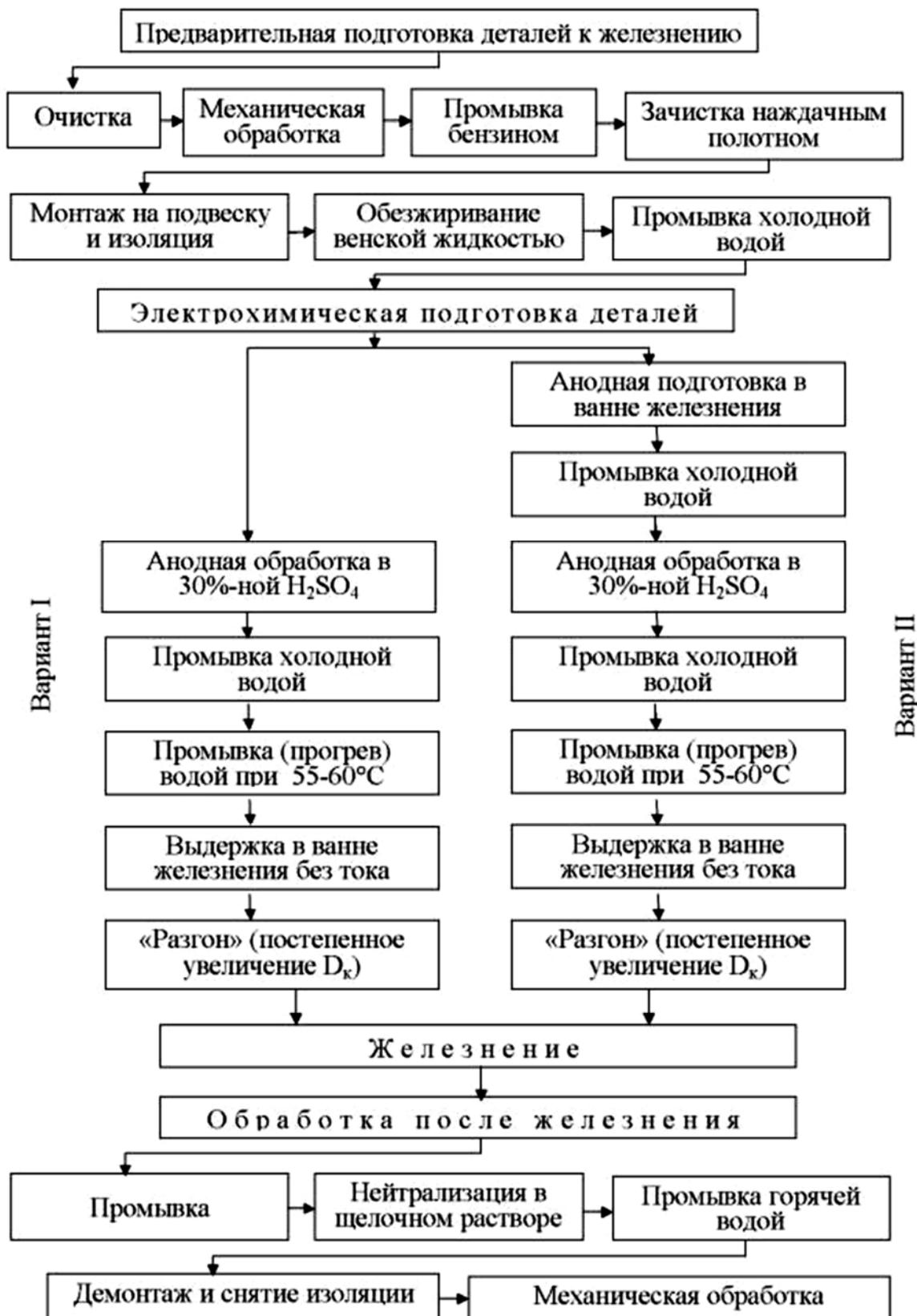


Рис. 5.21. Схема технологического процесса железнения

Вариант 1. Предварительная подготовка; очистка от грязи и масла, механическая обработка наращиваемых поверхностей, промывка бензином, изоляция участков, не подлежащих наращиванию, монтаж деталей в подвесные приспособления, обезжиривание венской известью, промывка холодной проточной водой.

Электрохимическая подготовка; анодная обработка в 30%-м растворе серной кислоты, промывка холодной водой, промывка (прогрев) горячей водой при 55-60°C, выдержка деталей в ванне железнения без тока, постепенное повышение плотности тока.

Железнение и окончательная обработка; железнение, промывка горячей водой, нейтрализация в щелочном растворе, промывка горячей водой, демонтаж деталей с подвесных приспособлений и снятие изоляции, окончательная механическая обработка.

Вариант 2. Вторая схема отличается от первой характером и порядком операций электрохимической подготовки деталей перед железнением, которая включает следующие операции: травление деталей в 10%-м растворе HCl, промывка холодной водой; анодная обработка в 30%-м растворе H₂SO₄; промывка (прогрев) водой при 55-60°C; выдержка деталей в ванне железнения без тока; постепенное повышение плотности тока.

Основным показателем качества наносимого покрытия, определяющим работоспособность восстановленной детали, является прочность сцепления покрытия с основой. Чтобы обеспечить хорошую адгезию, необходимо при подготовке деталей к железнению выполнить следующие требования: удалить с покрываемых поверхностей все загрязнения; снять поверхностный дефектный слой металла деталей; сохранить подготовленные поверхности в активном состоянии до начала осаждения на них металла.

Первое требование выполняется в стадии предварительной подготовки, когда с деталей удаляются следы износа и все загрязнения: ржавчина, масляная и окисная пленки и т.д.

Процесс железнения в горячих растворах хлористого железа характеризуется рядом особенностей: высокой химической активностью кислого горячего раствора хлористого железа; высокой температурой электролита; сильным испарением электролита; загрязнением электролита продуктами его окисления и анодным шламом; непрерывным уменьшением кислотности электролита; выделением вредных для здоровья обслуживающего персонала и для металлических частей оборудования участка испарений.

Этими особенностями процесса и вызваны особые требования к конструкции элементов установки. Стенки ванны должны обладать хорошей химической стойкостью при температурах до 70-90° С. Ванна должна иметь: нагревательное и вентиляционное устройства; устройство для поддержания уровня и кислотности электролита; непрерывное или периодически действующее фильтровальное устройство; систему штанг для завешивания деталей и анодов в ванне. Таким образом, установка для

железнения должна содержать следующие конструктивные элементы: ванну железнения, устройство для подвешивания анодов и деталей, устройство для нагрева электролита, устройство для фильтрации электролита, бак-отстойник, вентиляционное устройство для отвода испарений с зеркала ванны, распределительный щит и аппаратуру для автоматического регулирования режима работы установки.

Подвешивание деталей в ваннах при химической и электрохимической обработке производится с помощью специальных подвесных приспособлений. Хорошая конструкция приспособлений, применяемых для подвешивания деталей в ванну, является важнейшей предпосылкой для достижения высокой производительности процесса и качества электролитического покрытия [44, 45, 50].

Подвесные приспособления при осуществлении технологического процесса на участке железнения должны обеспечивать: надежный контакт детали с токоподводящими штангами ванны и удобство при переносе деталей. Детали на подвеске должны быть расположены так, чтобы было обеспечено беспрепятственное удаление пузырьков водорода, выделяющегося при электролизе [50]. Для этой цели покрываемые поверхности должны располагаться вертикально или наклонно, так как при горизонтальной завеске пузырьки водорода могут скапливаться на нижней стороне поверхности и стать причиной появления пористых участков.

Завешиваемые в ванну детали не должны экранировать друг друга, так как при этом увеличивается неравномерность покрытия.

По количеству деталей, одновременно монтируемых в приспособлениях, различают одноместные и групповые (многоместные) приспособления.

Одноместные приспособления используются для подвески деталей, поступающих в ремонт небольшими партиями, а также деталей, имеющих большой вес.

Групповые приспособления используют для небольших по весу деталей при серийном поступлении их на участок [44]. Внедрение групповых подвесок на производстве обеспечивает значительное повышение производительности труда и даёт большой экономический эффект [45]. Как показала практика железнения различных деталей, при тщательном уходе за контактными поверхностями приспособлений детали, снятые после железнения с одной подвески, характеризуются хорошей однородностью по толщине и качеству покрытий [43, 44, 49].

На поверхностях подвесок, не изолированных от действия электрического тока, железо осаждается с образованием дендритов, что затрудняет получение расчетной толщины железа на покрываемых деталях и вызывает непроизводительные потери электроэнергии и снижение производительности.

сти процесса [24, 36, 40, 44, 45, 49, 50]. Для устранения указанного недостатка поверхности подвесок, погружаемых в электролит, защищают изоляционными материалами.

Для железнения шатунов практичнее использовать групповые (многочестные) приспособления. В СГТУ на кафедре «Автомобили и автомобильное хозяйство» сконструировано подвесное приспособление для подвешивания трех шатунов. Анод 3 выполнен в виде конуса для более равномерного осаждения металла, которому препятствуют выделяющиеся в процессе электролиза пузырьки газа водорода (рис. 5.22) [26].

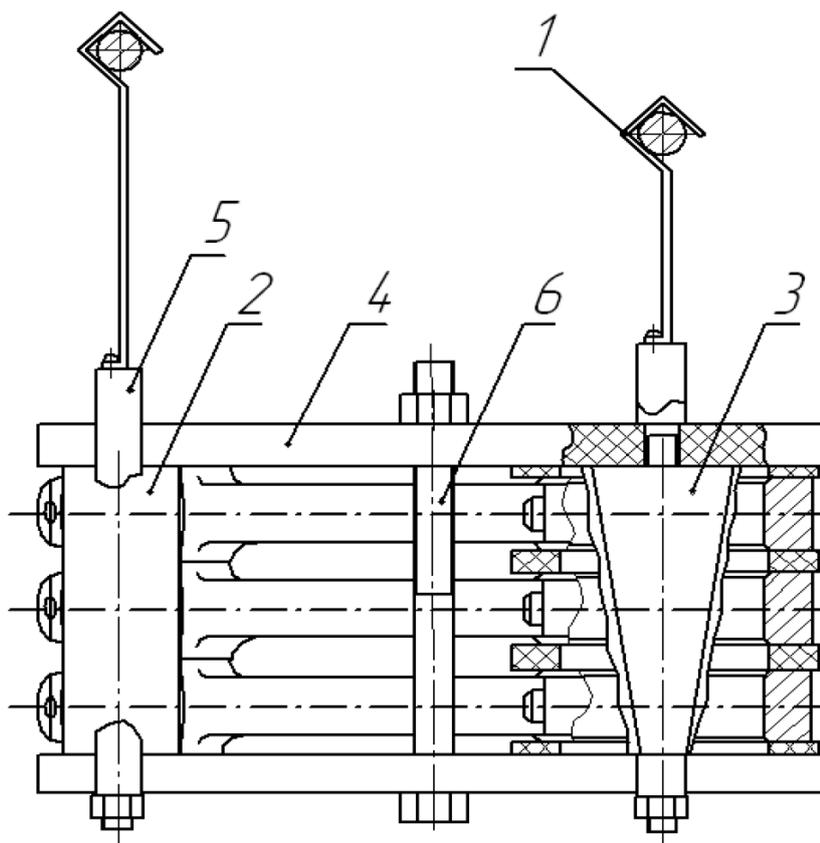


Рис.5.22. Подвесное приспособление для шатунов КамАЗ-740:
1 – крючок; 2 – катод; 3 – анод; 4 – изолирующие пластины; 5 – рамка; 6 – болт

Таким образом, предложенный технологический процесс восстановления шатуна обеспечивает стабильность формы шатунных вкладышей после ремонта [26].

5.3.2. Совершенствование технологии восстановления деталей электролитическим железным покрытием

Совместный разряд ионов металла и водорода, протекающий при электролизе металлопокрытий, как уже отмечалось ранее, приводит к изменениям структуры и свойств покрытий. Определенную роль в этом играет водород, адсорбирующийся в процессе электролиза на катоде [103, 157, 159, 320, 326]. Неравномерность газонаполнения выделяющимся водородом и растворенным в электролите кислородом, в межэлектродном пространстве, влияет на равномерность распределения толщины наносимого покрытия по длине и диаметру детали и способствует рассеиванию физико-механических свойств покрытия, определяющих его работоспособность [56].

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования (разд. 4) показали, что значительную роль при формировании равномерных металлопокрытий играет процесс десорбции водорода с поверхности покрытий [153-156]. На их основе разработан принципиально новый способ формирования покрытия в контролируемой разреженной атмосфере над зеркалом гальванической ванны (патент 2082835) [238]. Эксперименты, поставленные в этих условиях, подтвердили теоретические предпосылки о значительном сокращении количества поглощаемого водорода и, как следствие, – получение более равномерных и гладких покрытий с оптимальной величиной припуска на механическую обработку и однородностью физико-механических свойств [21, 24, 49, 50, 56].

5.3.3. Совершенствование технологии восстановления опор блока цилиндров

Проблема восстановления работоспособности базовых деталей, к которой и относится блок цилиндров двигателей внутреннего сгорания (рис. 5.23), актуальна как у легковых автомобилей, так и у грузовых автомобилей и автобусов, особенно зарубежного производства. Маршрут технологического процесса восстановления определяется дефектовочной операцией.

Данные по изменению технического состояния коренных опор блока цилиндров в процессе эксплуатации являются обоснованием основных этапов технологического процесса восстановления.

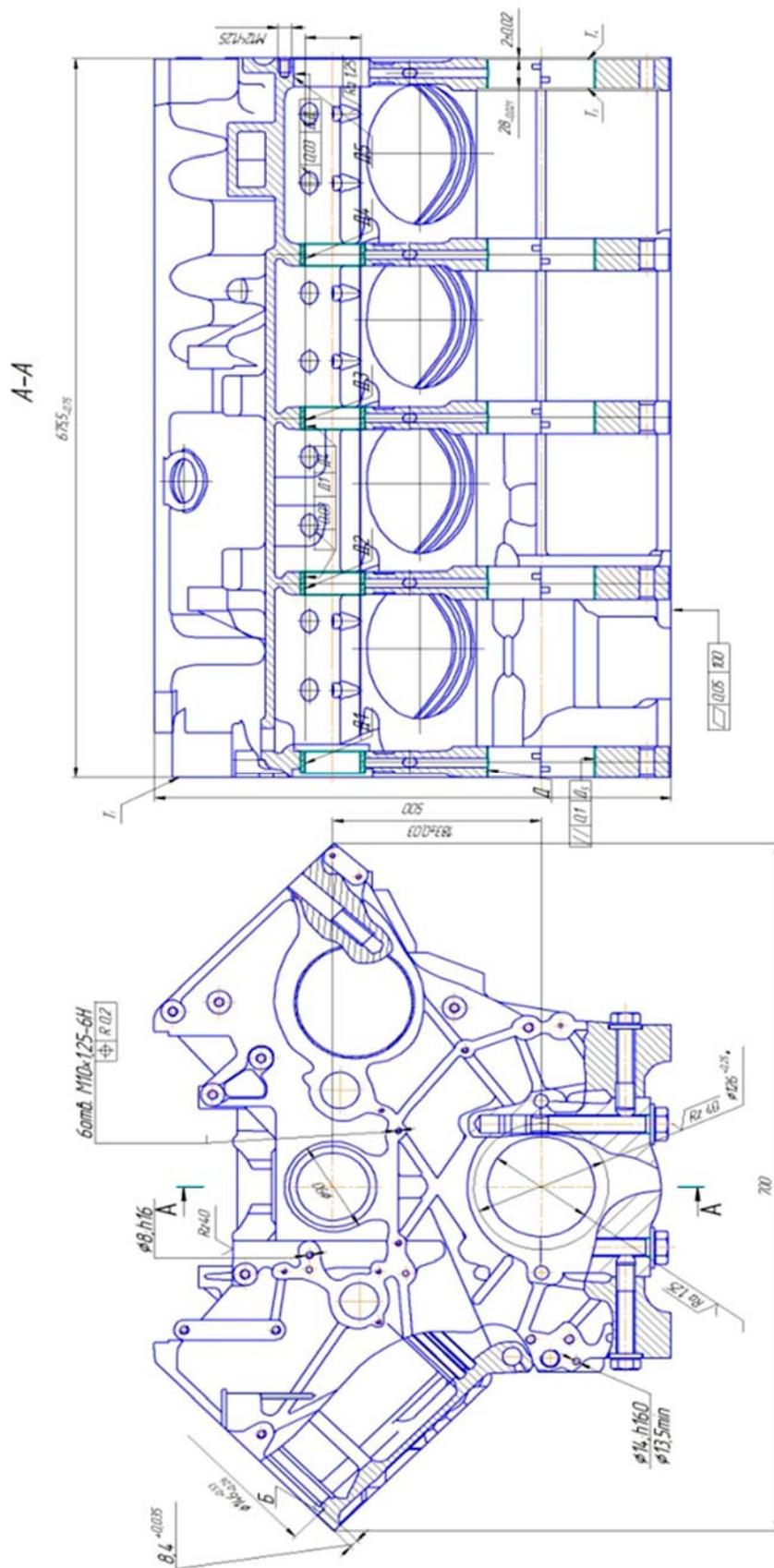


Рис. 5.23. Блок цилиндров двигателя КамАЗ-740

Существующие способы устранения дефектов опор блоков цилиндров:

- растачивание опор с последующим хонингованием под ремонтный размер;
- фрезерование торцов крышек опор, занижение оси опор на 0,02-0,03 мм и растачивание опор с последующим хонингованием;
- при износе опор более 0,3-0,5 мм необходимо наносить на изношенные поверхности металлопокрытие с последующей механической обработкой.

При восстановлении деталей машин электролитическим покрытием за основу взят технологический процесс железнения с двойной анодной обработкой деталей перед нанесением покрытия, имеющий широкие технологические возможности. В то же время, анализ предыдущих исследований позволяет сделать вывод, что существующий технологический процесс имеет структурное несовершенство. Оно проявляется в неравномерном распределении силовых полей по восстанавливаемой поверхности, что приводит к рассеиванию микротвердости покрытий, внутренних напряжений, толщины покрытия (припуска на механическую обработку), по длине восстанавливаемой поверхности и уменьшению технологической надежности по прочности сцепления наносимого покрытия с основой. С целью получения прочносцепляющихся электролитических покрытий железа с бестрещиновой, однородной структурой, с равномерным распределением осадков по всей длине восстанавливаемой поверхности деталей предложено проводить электролиз с созданием разрежения над зеркалом электролита (патент №2082835) [22, 40, 238].

Покрытия электролитического железа, полученные в условиях разрежения над зеркалом электролита, позволяют обеспечить стабильность и надежность проектируемых показателей, в покрытиях отсутствует слоистость, в них нет трещин, что свидетельствует о более монолитном покрытии (рис. 4.28, 4.29).

Использование данного технического решения при восстановлении постелей блоков цилиндров позволило улучшить физико-механические свойства наносимого электролитического покрытия и повысить долговечность двигателей.

Схема технологического процесса внеанодного железнения опор блоков цилиндров двигателей КамАЗ представлена на рис. 5.24.

Для восстановления опор блоков цилиндров наращиванием на изношенные поверхности электролитического железного покрытия разработана установка внеанодного железнения (патент №118427) (рис. 5.25) [235]. Внешний вид электролитической ячейки при осаждении электролитического железа на опоры блока цилиндров представлен на рис. 5.26.



Рис. 5.24. Схема технологического процесса вневанного железнения опор блока цилиндров двигателя КамАЗ

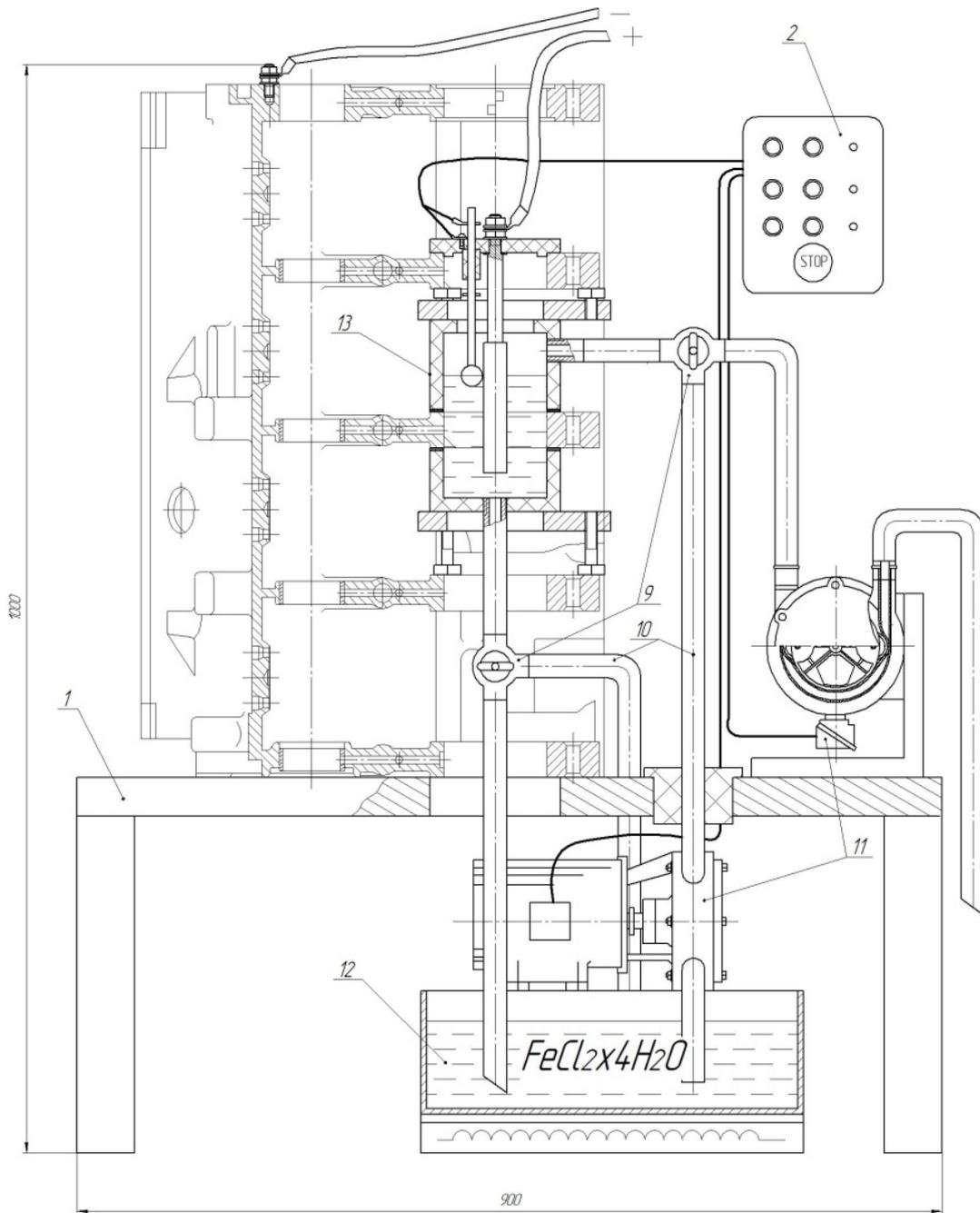


Рис. 5.25. Установка для вневанного железнения коренных опор блока цилиндров двигателя КамАЗ– 740:

- 1 – стол; 2 – блок управления; 3 –анодная крышка; 4 – датчик положения уровня электролита; 5 – анодная штанга; 6 – верхняя втулка; 7 – нижняя втулка; 8 – кольцо прижимное; 9 – трехходовой кран; 10 – трубопровод; 11 – перистальтический насос; 12 – ванна электролитическая с подогревом; 13 – электролитическая ячейка



Рис. 5.26. Внешний вид электролитической ячейки при осаждении электролитического железа на опоры блока цилиндров

Технологический процесс нанесения электролитических железных покрытий состоит из: предварительной подготовки, электрохимической обработки, электролитического нанесения покрытия и окончательной обработки. Предварительная подготовка восстанавливаемой опоры включает в себя: очистку поверхности от масла, ржавчины и других загрязнений, механическую обработку до удаления следов износа и дефектного поверхностного слоя, изоляцию отверстий маслоподводящих каналов с помощью резиновых пробок. Далее производят монтаж вневанного приспособления (электролитическую ячейку) на восстанавливаемой опоре, с помощью которой будет наноситься покрытие.

Устанавливают электролитическую ячейку 13 (рис. 5.26) с помощью двух металлических колец 8, с поджимными винтами. К корпусу обрабатываемого блока цилиндров двигателя подведен «-», к анодной штанге 5 «+».

Электрохимическая обработка включает в себя анодное травление в 10%-м растворе соляной кислоты (HCl) и анодную очистку в 30%-м растворе серной кислоты (H₂SO₄).

Процесс нанесения покрытия проводят в электролите, содержащем: 580-600 г/л хлористого железа; хлористый никель 15-25 г/л; 1,8-2 г/л соляной кислоты при следующих режимах: плотность тока – 15 А/дм² и температура электролита – 70-80 °С.

Внешний вид покрытия электролитического железа, осажденного на опоры блока цилиндров, представлен на рис. 5.27.



Рис. 5.27. Внешний вид покрытия электролитического железа, осажденного на опоры блока цилиндров

После нанесения покрытия необходимо провести ряд окончательных операций:

- промывка;
- нейтрализация в щелочном растворе;
- промывка горячей водой;
- демонтаж вневанного приспособления;
- механическая обработка восстанавливаемой коренной опоры.

Промывка коренной опоры блока происходит в горячей воде при температуре 60 °С. Нейтрализация проводится в 10%-ном растворе каустической соды. После демонтажа вневанного оборудования продуть коренную опору сжатым воздухом.

Последняя операция заключается в механической обработке восстанавливаемой коренной опоры двигателя, в номинальный размер.

Таким образом, контроль размеров и формы ресурсопределяющих поверхностей деталей и восстановление их по потребности, снизит затраты на обеспечение работоспособности силовых агрегатов автомобиля за счет предупреждения отказов и своевременного их устранения на основе прогнозирования технического состояния и закономерностей формирования свойств поверхностей ресурсопределяющих деталей при восстановлении.

5.4. Технология восстановления деталей наплавочными металлопокрытиями

При восстановлении деталей машин наплавочными металлопокрытиями за основу взят технологический процесс наплавки под слоем флюса (по технологии лаборатории восстановления деталей наплавочными металлопокрытиями кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» СГТУ имени Гагарина Ю.А.), табл. 5.9.

Т а б л и ц а 5.9

Технологический процесс восстановления коленчатого вала двигателя
КамАЗ

Номер пп	Наименование операции	Цель технологической операции
1	Моечная	Тщательная очистка коленчатого вала
2	Слесарная	Зачистка шеек перед дефектоскопией
3	Дефектовочная	1. Магнитная дефектоскопия; 2. Контроль-сортировка
4	Слесарная	Удаление трещин
5	Дефектовочная	Контрольная магнитная дефектоскопия
6	Термическая	Предварительный подогрев шеек коленчатого вала до температуры от 100 до 250 °С
7	Наплавочная	Наплавка шеек вала проволокой сплошного сечения марки Нп-30ХГСА
8	Термическая	Отпуск при температуре 500 °С в течение 1 ч
9	Токарно- винторезная	Черновое точение шеек в пределах 0,5 мм до номинального размера
10	Слесарная	Вскрытие и зенкование масляных отверстий
11	Термическая	Нагрев коленчатого вала в пределах 340-400 °С
12	Прессовая	Правка вала в горячем состоянии
13	Дефектовочная	Магнитная дефектоскопия
14	Круглошлифовальная	1. Чистовая шлифовка шеек коленчатого вала; 2. Полирование шеек коленчатого вала
15	Слесарная	Монтаж съемных противовесов, заглушек и других деталей
16	Балансировочная	Динамическая балансировка коленчатого вала
17	Дефектовочная	Окончательная магнитная дефектоскопия
18	Моечная	Мойка с продувкой маслоканалов
19	Контрольная	Контроль основных геометрических параметров коленчатого вала (диаметров коренных и шатунных шеек, величины биения центральной коренной шейки)
20	Упаковочная	Упаковка с консервацией

Восстановление коленчатых валов наплавкой под слоем флюса (рис. 5.28), с последующей механической обработкой, позволяет повысить их эксплуатационный ресурс, обеспечивая стабильность размеров и формы восстановленных поверхностей и физико-механических свойств нанесенного металлопокрытия [9, 41].

Наплавляют легированной проволокой Нп-30ХГСА при режиме: напряжение дуги – 25...30 В; сила тока – 180...220 А; шаг наплавки – 4...6 мм/об; скорость подачи проволоки – 1,6...2,1 м/мин; частота вращения вала – 2...2,5 мин⁻¹ – при наплавке коренных и 2,5...3 мин⁻¹ – при наплавке шатунных шеек [9, 41].



Рис. 5.28. Наплавка шеек коленчатого вала КамАЗ–740

Наплавленный металл монолитен, не имеет трещин, пор, обладает твердостью 32...40 HRC, возникающие в поверхностном слое полезные сжимающие остаточные напряжения имеют значительную величину. В то же время технологический процесс нанесения наплавочных металлопокрытий под слоем флюса не обеспечивает необходимый ресурс восстановленной детали кривошипа.

Анализ наплавочных процессов восстановления коленчатых валов, в том числе зарубежных [294, 295, 298], теоретических и экспериментальных исследований позволил усовершенствовать технологический процесс наплавки под слоем флюса разработанный в СГТУ [9, 41]. Схема предлагаемого технологического процесса представлена ниже (рис. 5.29).



Рис. 5.29. Схема технологического процесса восстановления коленчатых валов двигателя КамАЗ

В связи с этим, для повышения усталостной прочности, предложено обкатывать галтели кривошипа на глубину до 0,5 мм, а для повышения задиростойкости создавать на поверхности шеек коленчатых валов, электрохимическим натиранием, металлоплакирующий слой меди, позволяющий уменьшить коэффициент трения и приводящий к значительному снижению износа пары трения (рис. 5.30).



Рис. 5. 30. Внешний вид металлоплакирующего покрытия меди на шейке вала

Результат достигается за счет равнопрочности антифрикционного слоя вкладыша и плакирующего слоя, медного покрытия, на шейке вала (контртела) и равенства положительных градиентов механических свойств между телами 1-3 и 2-3, при этом обеспечивается равновесие микропереноса и достижение эффекта безызносности (рис. 5.31):

$$\frac{\partial M_{1-3}}{\partial Z} = \frac{\partial M_{2-3}}{\partial Z}; \text{ при } \sigma_1 = \sigma_2, \quad (5.15)$$

где $\frac{\partial M_{1-3}}{\partial Z}$ – градиент механических свойств на границе разделов между телами 1-3; σ_1, σ_2 – прочность тел 1 и 2.

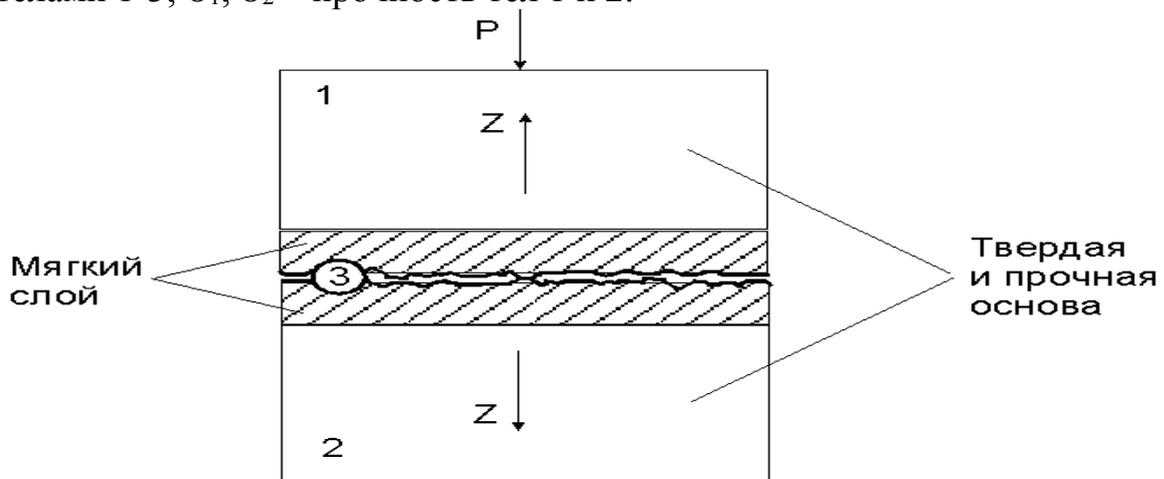


Рис. 5.31. Модель оптимального трибосопряжения по И.В. Крагельскому

Сущность процесса оптимального трибосопряжения аналогична процессу, который происходит при избирательном переносе, возникающем при использовании присадок в маслах, на основе меди, с созданием защитной медной пленки толщиной 1-2 мкм.

В отличие от вышеописанного, создается слой медного покрытия, толщиной 2-3 мкм на шейках коленчатого вала электрохимическим натиранием. В результате протекания на поверхности контактирующих тел химических и физических процессов, происходит образование самоорганизующихся систем автокомпенсации износа и снижения трения. Это подтверждается данными исследований условий схватывания поверхностей трения, проведенных на четырехшариковой машине трения, в соответствии с методикой, изложенной в разд. 2.

Исследовался момент трения и схватывания при возрастающей нагрузке на сопряженных поверхностях стальных и омедненных шариков при трении скольжения.

Сочетание сопряжений исследуемых поверхностей:

- 1– верхний стальной шарик – нижние стальные шарики (сталь-сталь);
- 2– верхний стальной омедненный шарик – нижние стальные шарики (медь-сталь);
- 3– верхний стальной шарик – нижние стальные омедненные шарики (сталь-медь);
- 4 – верхний стальной омедненный шарик – нижние стальные омедненные шарики (медь-медь).

Результаты исследований приведены на рис. 5.32.

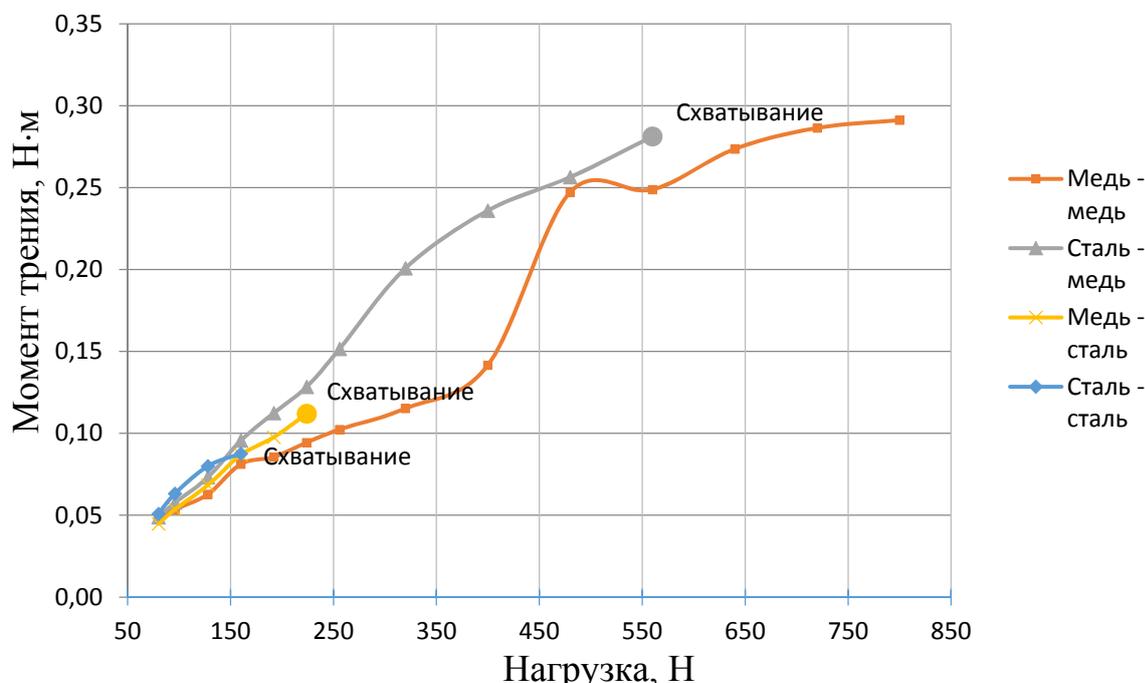


Рис. 5.32. Результаты исследования момента трения от нагрузки на четырехшариковой машине трения

Схватывание между металлическими поверхностями при трении происходит вследствие пластического деформирования на площадках фактического контакта и внедрения одной поверхности металла в другую, когда происходит удаление окисных и адсорбированных пленок масел (рис. 5.33).

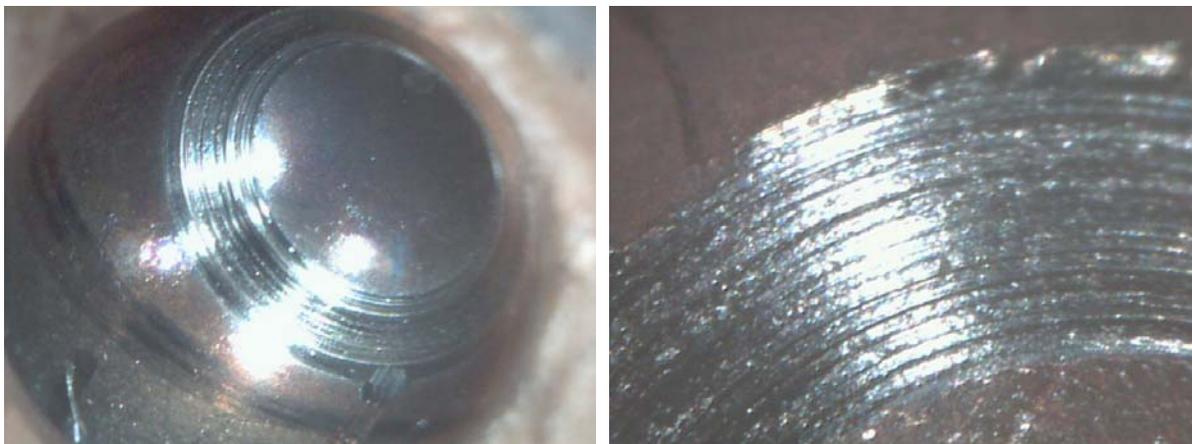


Рис. 5.33. Следы задиры на поверхности стального шарика вследствие фактического контакта с поверхностью других шариков при отсутствии масляной пленки

При трении стальных исследуемых шариков при нагрузке 160 Н момент трения увеличивался до 0,13 (Н.м) и происходило схватывание.

Результаты исследования трения верхнего омедненного шарика о нижние стальные шарики показывают, что схватывание поверхностей трения произошло при нагрузке, несколько большей (224 Н), чем при предыдущем исследовании. Это объясняется наличием тонкой пленки мягкого материала на твердой сопряженной поверхности, и когда при трении происходит удаление масляных и окисных пленок, некоторое время роль смазки играет пленка плакирующего медного покрытия.

Результаты исследования трения верхнего стального шарика о нижние омедненные шарики показывают, что с увеличением площади медного покрытия нагрузка, при которой происходит схватывание (рис. 5.34), значительно больше (560 Н), рис. 5.33.



Рис. 5.34. Поверхность шариков после схватывания

Наилучшие результаты показала пара трения из всех четырех омедненных шариков, нагрузка была увеличена в два раза и достигала 800 Н, но схватывания сопряженных поверхностей трения не происходило (рис. 5.35).



Рис. 5.35. Поверхность шариков при оптимальном трибосопряжении

Механизм работы данного сопряжения следующий. В зоне непосредственного контакта медная пленка упрочняется и при тангенциальном смещении разрыв происходит в глубине медной пленки. Внешнее трение переходит во внутреннее, при этом медный слой играет роль твердой смазки.

5.5. Технология создания плакирующего медного покрытия на поверхностях трения

Техническое решение снижения трения в подшипниках скольжения на переходных режимах осуществляется осаждением электролитического медного покрытия на трущуюся поверхность тел вращения либо в стационарных ваннах электрохимического осаждения, либо, если деталь больших размеров и сложной формы, вневанными электролитическим осаждением меди – натирием. Наличие пластичных поверхностных слоев способствует более равномерному распределению давления, снижению поверхностных температур, предотвращается пластическая деформация глубинных слоев металла, что устраняет схватывание, а также уменьшается износ вследствие передеформирования и контактной усталости рабочих поверхностей вкладышей. Медь заполняет микровпадины, уменьшая шероховатость трущихся поверхностей и, следовательно, приводит к снижению коэффициента трения в сопряжении.

Процесс нанесения медного покрытия на шейки коленчатого вала после восстановления представлен в табл. 5.10.

Т а б л и ц а 5.10

Технологический процесс нанесения электролитического медного покрытия на шейки коленчатого вала двигателя КамАЗ

Номер	Наименование операции	Цель технологической операции
1	Моечная	Тщательная очистка коленчатого вала
2	Слесарная	Установка коленчатого вала на опоры приспособления, присоединения к приводу вращения
3	Моечная	Обезжиривание покрываемых поверхностей
4	Слесарная	Подключение приспособления с анодом к обрабатываемой поверхности шейки
5	Меднение	Нанесение покрытия $D_k = 1,5-2 \text{ А/дм}^2$, $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.
6	Моечная	Промывка обрабатываемых поверхностей горячей водой с продувкой масляных каналов
7	Слесарная	Демонтаж коленчатого вала с опоры приспособления
8	Контрольная	Контроль основных геометрических параметров коленчатого вала (диаметры коренных и шатунных шеек)

Состав электролита меднения:

- медь (в пересчете на металл) – 20-25 г/л;
- железисто-синеродистый калий – $K_4 Fe(CN)_6$ – 180-220 г/л;
- сегнетова соль – $KNaC_4H_4O_6$ – 90-110 г/л (ГОСТ 5845-79);
- кали едкое – 8-9 г/л (ГОСТ 9285-78);
- карбоксиметилцеллюлоза – 0,5-2 г/л.

Режим осаждения:

– рабочая температура – 18-25⁰С;

– плотность тока -1,5-2 А/дм² ;

– выход металла по току – 80%.

Предлагаемый способ снижения трения в подшипниках скольжения (шейках коленчатых валов) осуществляется следующим образом (рис. 5.36).

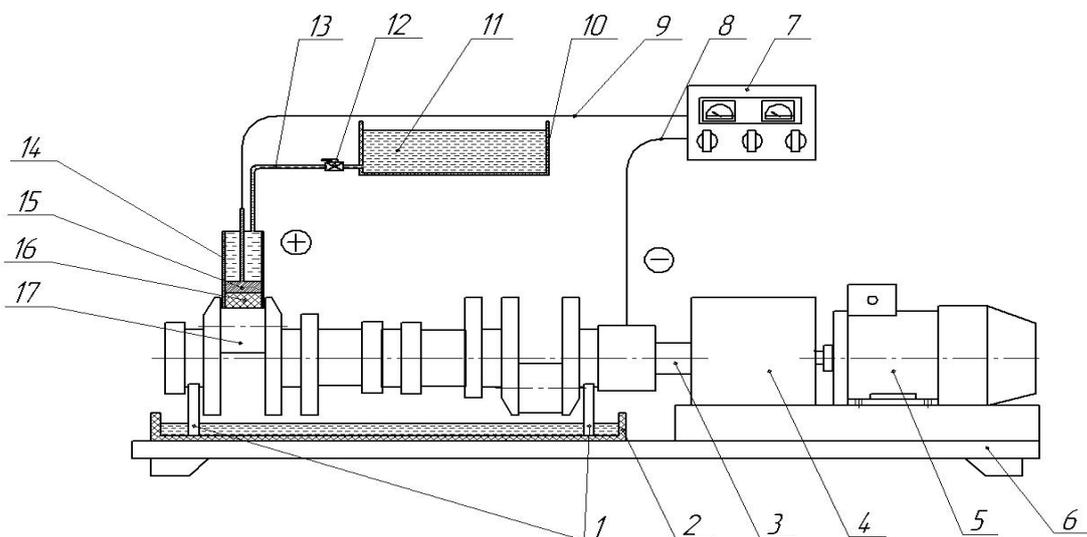


Рис. 5.36. Установка вневанного нанесения медного электролитического покрытия на шейках коленчатых валов:

- 1 – опоры; 2 – поддон для сбора электролита; 3 – карданная передача;
4 – редуктор; 5 – электромотор; 6 – станина; 7 – панель управления;
8 – токоподводящие провода к катоду; 9 – токоподводящие провода к аноду;
10 – ванна с электролитом; 11 – электролит меднения; 12 – кран; 13 – трубка подвода электролита; 14 – вневанное приспособление (ячейка) меднения с электролитом; 15 – медный анод; 16 – губка; 17 – коленчатый вал

Коленчатый вал 17 укладывается на опоры установки 1 и подсоединяется к приводному валу. К шейке коленчатого вала монтируется приспособление для натирания 7 (диэлектрическая трубка с медным анодом и электролитом). Электродвигатель 5 через редуктор 4 и приводной вал 3 приводит коленчатый вал во вращение. К аноду (медной пластине) и катоду (коленчатому валу) подается напряжение. Таким образом, на поверхность шейки коленчатого вала 17 наносится слой меди толщиной 2-3 мкм, с высокими адгезионными свойствами. Такая толщина медного покрытия соответствует размерам микронеровностей или перекрывает их (рис. 5.37).

Данный слой в дальнейшем играет роль твердой смазки, препятствующей задирам и схватыванию сопряжения при режимах полужидкостной смазки в процессе эксплуатации.

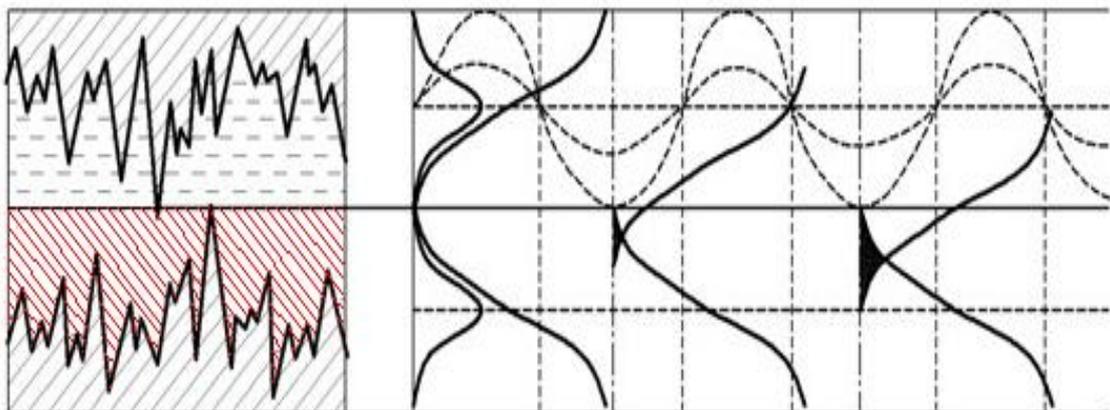


Рис. 5.37. Схема заполнения микронеровностей медным плакирующим покрытием и взаимодействие микронеровностей поверхности трения при постоянном и переменном режимах

Другим примером создания медного плакирующего покрытия на поверхностях трения является нанесение покрытия в стационарных ваннах. Схема электроосаждения медного покрытия на поверхность вала ротора турбокомпрессора представлена на рис. 5.38.

Вал ротора 1 завешивается в ванну 2 электрохимического осаждения, заполненную электролитом 3. Аноды 4 представляют собой медные пластины, завешенные в ванне.

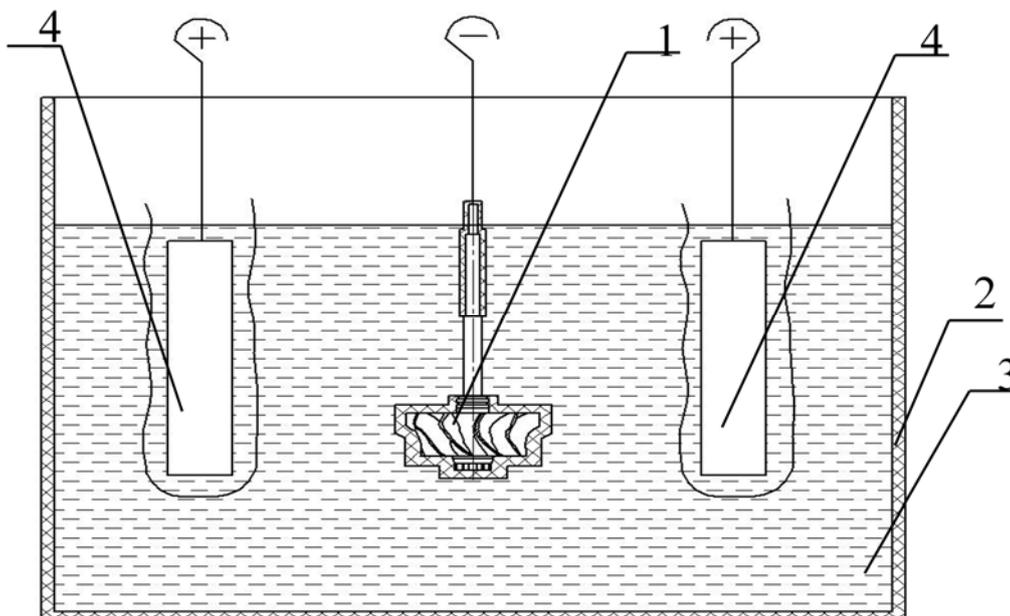


Рис. 5.38. Электролитическое осаждение меди в стационарных ваннах электрохимического осаждения

Производят электролитическое осаждение меди толщиной 2-3 мкм, после чего деталь промывают и направляют на сборку. Нанесенный слой меди представляет собой антифрикционный материал, препятствующий схватыванию деталей и образованию задиров.

При использовании данного способа:

- 1) исключается схватывание поверхностей трения;
- 2) снижается коэффициент трения;
- 3) уменьшается шероховатость трущихся поверхностей;
- 4) снижается износ подшипников скольжения.

Таким образом, предложены технологические процессы восстановления ресурсоопределяющих деталей, основанные на закономерности формирования свойств поверхностных слоев, что позволяет существенно повысить их вторичный ресурс.

5.6. Выводы

1. Результаты стендовых моторных испытаний и эксплуатационных исследований двигателей КамАЗ подтвердили справедливость аналитических зависимостей (3.7), (3.13), (3.92) по шатуну, подшипникам коленчатого вала, опорам блока цилиндров и по турбокомпрессору. Данные зависимости позволяют определить предельные значения показателей технического состояния коленчатого вала, шатуна, опор блока цилиндров, турбокомпрессора для обоснования выбора технологии восстановления.

2. Показатели технического состояния исследуемых ресурсоопределяющих деталей двигателя КамАЗ в процессе эксплуатации распределяются по нормальному и экспоненциальному законам.

Интенсивность изменения технического состояния исследуемых ресурсоопределяющих деталей в процессе эксплуатации после восстановления по предложенной технологии ниже, чем без ремонтных воздействий (в частности у шатунов и опор блоков цилиндров в среднем на 15% ниже, чем после замены вкладышей без ремонта).

3. Усовершенствованы технологические процессы восстановления ресурсоопределяющих деталей на основе дефектовки по макрогеометрическим показателям. Основное внимание при восстановлении уделяется устранению макрогеометрических отклонений с использованием процесса электролитического железнения и созданию на трущихся сопряжениях плакирующего медного покрытия, играющего роль твердого смазочного материала, что позволяет предотвратить задиры шеек при критических условиях смазки.

4. С целью повышения ресурса двигателей КамАЗ-Евро необходимо совершенствование структуры эксплуатационно-ремонтного цикла форсированных двигателей.

5. Для форсированных дизелей обоснована трехстадийная кривая старения моторного масла (5.13), которую целесообразно аппроксимировать полиномом третьей степени (5.14). Такой характер зависимостей подтвержден результатами эксплуатационных исследований с высокой степенью достоверности. Для повышения срока службы масла, долговечности турбокомпрессоров и всего силового агрегата в целом целесообразно снизить теплонапряженность подшипникового узла ТКР. Это возможно использованием автономной системы смазки ТКР.

6. Разработанная и изготовленная автономная система смазки турбокомпрессоров прошла испытания на заводе двигателей ОАО «КАМАЗ» и в эксплуатационных условиях. Использование автономной системы смазки позволяет снизить температуру подшипникового узла и обеспечить его температурный режим, не превышающий предельных значений 95-100 °С на всех режимах работы двигателя, что обеспечивает повышение надежности как ТКР, так и всего силового агрегата.

6. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные исследования позволили разработать практические рекомендации, повышающие долговечность двигателей автомобилей КамАЗ.

Основу рекомендаций составляют конструктивно-технологические и эксплуатационно-ремонтные решения, эффективность которых показывают результаты эксплуатационных исследований.

6.1. Эффективность совершенствования восстановительных технологий

Технологические и опытно-конструкторские разработки, выполненные на основе теоретических и экспериментальных исследований табл. 6.1, направлены на повышение долговечности автомобильных двигателей.

Предложены технологические процессы восстановления ресурсоопределяющих деталей двигателей, основанные на закономерности формирования свойств поверхностных слоев, позволяющие существенно повысить их вторичный ресурс. Совершенствование восстановительных технологий, заключающееся в повышении точности размеров, форм и однородности физико-механических свойств заготовок, формируемых электролитическим железным покрытием и наплавочными покрытиями, призваны снизить себестоимость капитального ремонта автомобилей при одновременном повышении его качества. Материалы диссертационной работы являются основой для разработок принципиально новых технологических процессов электроосаждения металлов сопровождающихся выделением водорода и усовершенствования технологического процесса восстановления деталей наплавочными металлопокрытиями с последующим созданием плакирующего медного покрытия на шейках коленчатых валов, играющего роль твердого смазочного материала, что позволяет предотвратить задиры шеек при критических условиях смазки.

Т а б л и ц а 6.1

Конструктивно-технологические мероприятия по повышению
долговечности двигателя

№	Мероприятия	Эффект
1	2	3
1.	Создано и внедрено в технологические процессы текущих и капитальных ремонтов силовых агрегатов, измерительное устройство, позволяющее определять прогиб шатуна, параллельность верхней и нижней головок шатуна, корсетность нижней головки шатуна (патент №68755)	Позволяет повысить качество дефектовки
2.	Создано и внедрено в технологические процессы текущих и капитальных ремонтов силовых агрегатов измерительное устройство для определения соосности коренных опор блоков цилиндров (патент №104691)	Позволяет повысить качество сборки блока цилиндров с коленчатым валом
3.	Усовершенствован способ нанесения электролитических железных покрытий при восстановлении автомобильных деталей (патент №2082835)	Позволяет повысить точность размеров, формы и однородность физико-механических свойств поверхностей деталей формообразуемых электролитическим железным покрытием;
4.	Усовершенствована технология восстановления коренных опор блоков цилиндров, вневанным электролитическим осаждением железоникелевых покрытий (патент №118427)	Снижение затрат на ремонт двигателей сокращением выбраковки блоков
5.	Усовершенствована технология восстановления коленчатых валов двигателей КамАЗ наплавкой под слоем флюса с последующим созданием на поверхности шеек плакирующего медного покрытия, выполняющего роль твердой смазки	Снижает вероятность задира шеек коленчатых валов с вкладышем при граничных условиях смазки

1	2	3
6.	Создано устройство – автономная система смазки турбокомпрессора (патент № 93462), обеспечивающая трущиеся поверхности смазочным материалом, в предпусковой момент, во время работы двигателя и после его остановки	Повышает эксплуатационный ресурс турбокомпрессора и двигателя в целом

Эффективность приведенных в таблице 6.1 мероприятий можно оценить по изменению уровня рекламаций.

6.2. Эффективность совершенствования эксплуатационно-ремонтных циклов двигателей

Существующая структура эксплуатационно-ремонтного цикла (ЭРЦ) двигателей неспособна обеспечить требуемой долговечности форсированных двигателей, так как основывается на устранении внезапных отказов и капитальных ремонтов двигателей.

При такой структуре удельные затраты растут после второго капитального ремонта (КР), то есть он не обеспечивает нормативного вторичного ресурса и оптимальным с экономической точки зрения при этом следует считать ресурс двигателей 270 тыс. км (рис. 6.1) [51].

Результаты аналитических и экспериментальных исследований определяют возможность повышения долговечности форсированных двигателей через систему планово текущих ремонтов (ПТР), предупредительных (ПР) и капитальных ремонтов рис. 6.1, что позволяет снизить затраты на поддержание их работоспособности за счет совершенствования методов оценки и восстановления технического состояния основных элементов двигателей, сокращения числа аварийных отказов, что повышает эффективность эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей.

При рациональной структуре ЭРЦ двигателей минимум удельных затрат наступает перед вторым капитальным ремонтом. Таким образом, общая структура эксплуатационно-ремонтного цикла форсированных двигателей включает: первый плановый текущий ремонт через -75 тыс. км; первый предупредительный ремонт через – 135 тыс. км; второй плановый текущий ремонт через -195 тыс. км; капитальный ремонт через – 250 тыс. км; третий плановый текущий ремонт через – 310 тыс. км; второй предупредительный ремонт через – 360 тыс. км; четвертый плановый текущий ремонт через – 410 тыс. км; списание – 460 тыс. км (рис.6.1) [47, 51].

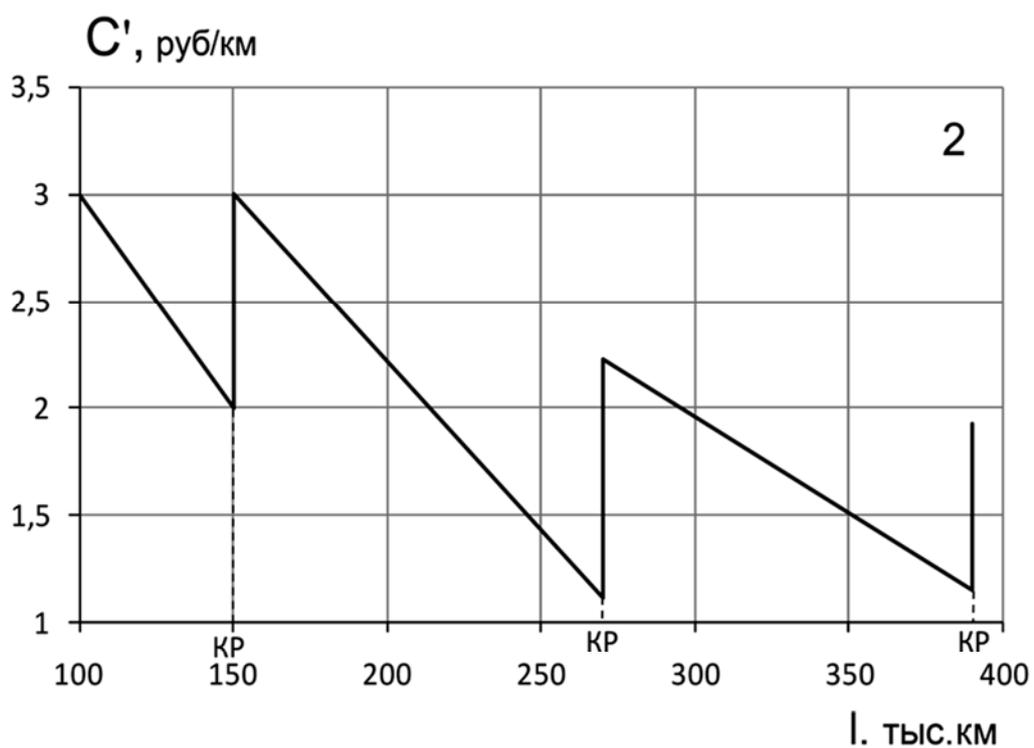
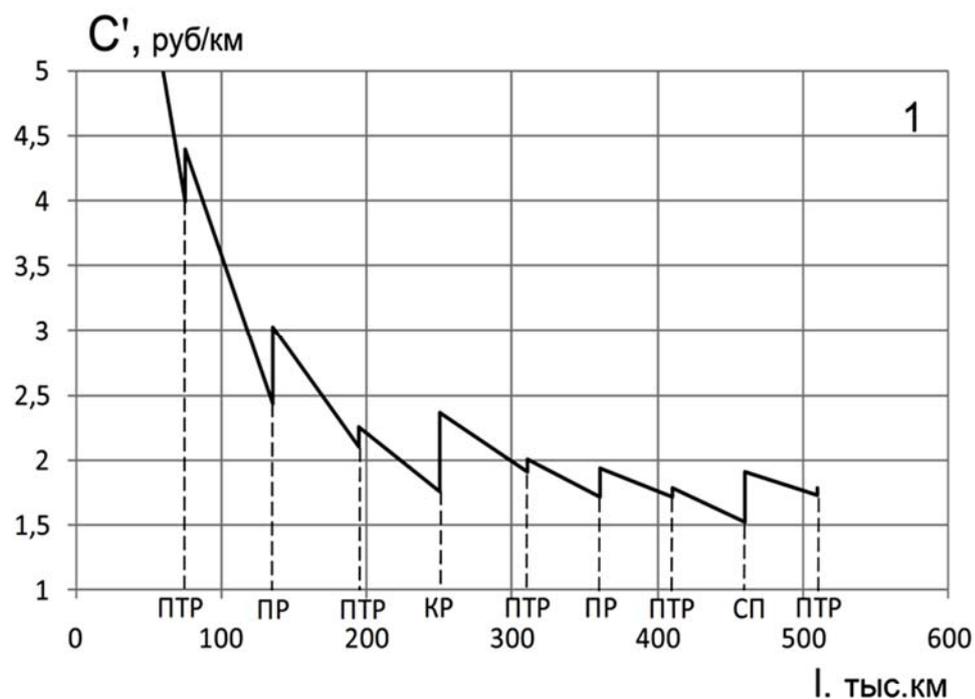


Рис. 6.1. Изменение удельных затрат на обеспечение работоспособности двигателей КамАЗ-Евро в процессе эксплуатации:
 1 – при предлагаемой структуре ЭРЦ; 2 – при существующей структуре ЭРЦ
 ПТР – плановый текущий ремонт; ПР - предупредительный ремонт;
 КР – капитальный ремонт; СП – списание

При предупредительном ремонте производят работы по замене вкладышей коленчатого вала, поршневых колец, ремонту или замене турбокомпрессоров. Предлагаемая схема технологического процесса ремонта двигателя КамАЗ-Евро представлена на рис.6.2.



Рис. 6.2. Схема ремонта двигателя КамАЗ-Евро

Совершенствование структуры эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей, вводя в систему планово-текущий ремонт и предупредительный ремонт его ресурсопределяющих элементов, позволяет повысить ресурс силового агрегата. Введение данных видов ремонтов обусловлено технической и экономической целесообразностью, поскольку заменой или ремонтом дешевых деталей обеспечивается работоспособность дорогих, уменьшается число аварийных отказов, что снижает удельные затраты на обеспечение работоспособности и количество капитальных ремонтов силового агрегата. При этом снижается трудоемкость и время ремонта силового агрегата [47, 51].

Наработка до предупредительного ремонта определяется экономически по критерию минимальных суммарных удельных затрат с учетом кинетики предотказного состояния и вероятностного характера возникновения отказов и основана на предельных значениях показателей технического состояния основных элементов двигателей.

6.3. Результаты внедрения рекомендаций и технологических процессов в производство

Результаты диссертационной работы прошли производственные испытания в ОАО «КАМАЗ» г. Набережные Челны и были реализованы в 6 организациях ООО «Саратовский Автоцентр КАМАЗ», ОАО «Балаковский ПАК» г. Балаково, ООО «Авторемонт – Т», ОАО «Межгородтранс» г. Саратов, ЗАО «Ремдизель» г. Набережные Челны и используются в технологических процессах текущих и капитальных ремонтов силовых агрегатов автомобилей этих предприятий. Результаты работы используются при восстановлении и упрочнении автомобильных деталей и других механизмов научно-технологическим центром НТЦ «Механик – Т» г. Саратов. Результаты работы используются в рамках производственной деятельности предприятия по ремонту и техническому обслуживанию гидравлических систем и оборудованию автомобилей, сельскохозяйственной и другой техники в ОАО «Гидросервис».

Материалы работы используются в лекционных курсах, дипломном и курсовом проектировании студентов Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., а также могут быть полезны для инженеров и работников, специализирующихся в области технического обслуживания, ремонта автомобилей, восстановления автомобильных деталей и другой техники. Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

6.4. Техничко-экономическая оценка эффективности исследования

Для оценки эффективности предложенной технологии восстановления элементов двигателя (шатуна, блока цилиндров, коленчатых валов), были проведены эксплуатационные исследования по методике, изложенной в главе 2. Результаты обработки приведены на рис.6.3 и в табл. 6.2., табл.6.3, табл. 6.4 [26].

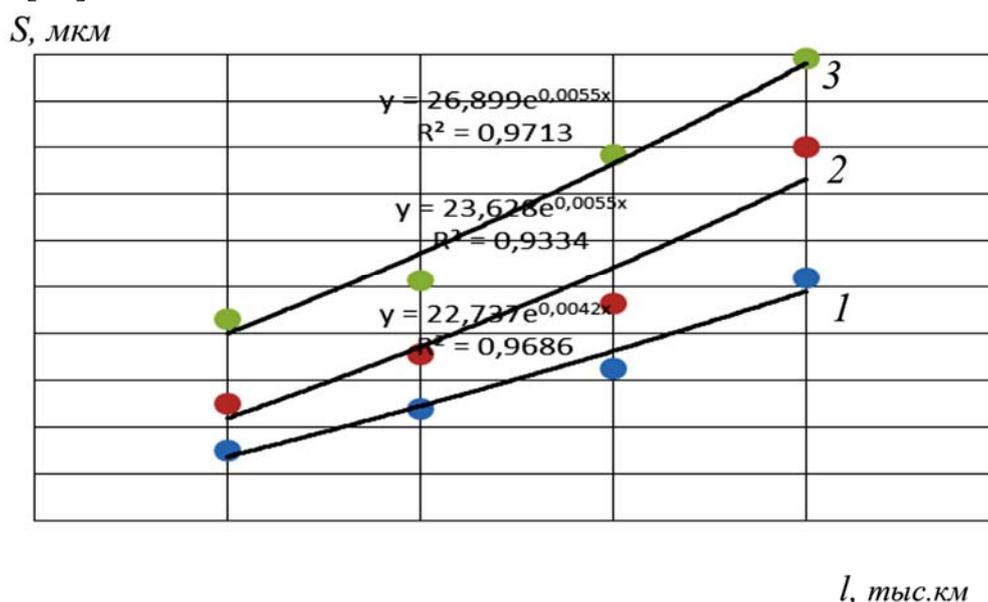


Рис.6.3. Зависимость диагностического параметра (прогиба) шатунных вкладышей от наработки двигателей КамАЗ-740:

1 - не отремонтированные (новые) двигатели; 2 - после восстановления шатунов по предлагаемой технологии; 3 - после КР с заменой вкладышей без ремонта шатунов

Таблица 6.2
Коэффициенты зависимости диагностического параметра (прогиб) шатунных вкладышей от наработки двигателей КамАЗ [26]

Группы двигателей	Параметры		
	y_0 , мкм	b , 1/тыс.км	R^2
1. Неотремонтированные (новые) двигатели	22,73	0,004	0,968
2. После восстановления шатунов по предлагаемой технологии	23,62	0,005	0,933
3. После КР с заменой вкладышей без ремонта шатунов	26,89	0,005	0,971

Т а б л и ц а 6.3

Параметры распределения межремонтного ресурса
крупногабаритных коленчатых валов

Наименование валов	Средние значения, L (тыс. км)	стандартное отклонение, σ (тыс. км)	Коэффициент вариации	Относительный вторичный ресурс (L2/L1)
Новые	195,2	106,2	0,544	-
Восстановленные	157,4	84,54	0,537	0,806

Т а б л и ц а 6.4

Параметры распределения ресурса опор блоков цилиндров

Показатели технического состояния постели блока цилиндров, мкм	Параметры		Критерии	
	Y_0	b	R^2	F_p
Новые	8,35	0,0058	0,911	10,24
Восстановленные	8,27	0,0052	0,92	10,25

Анализ данных показывает, что восстановление ресурсоопределяющих элементов силового агрегата (шатунных и опорных блоков цилиндров) по предложенной технологии (электролитическим железнением), позволяет повысить эксплуатационный ресурс двигателей в среднем на 15%.

Основным направлением повышения долговечности восстановленных коленчатых валов является создание на шейках валов плакирующего медного покрытия, (рис.5.22, 5.23) играющего роль твердой смазки, что позволяет снизить вероятность задиров и обеспечить их ремонтпригодности в течение всего эксплуатационно-ремонтного цикла.

Эффективность предложенного метода повышения долговечности восстановленных коленчатых валов исследовалось по эксплуатационным испытаниям 80-ти новым и 80-ти восстановленным по предложенной технологии коленчатым валам. Результаты исследований представлены на рис. 6.4, 6.5 и табл. 6.3.

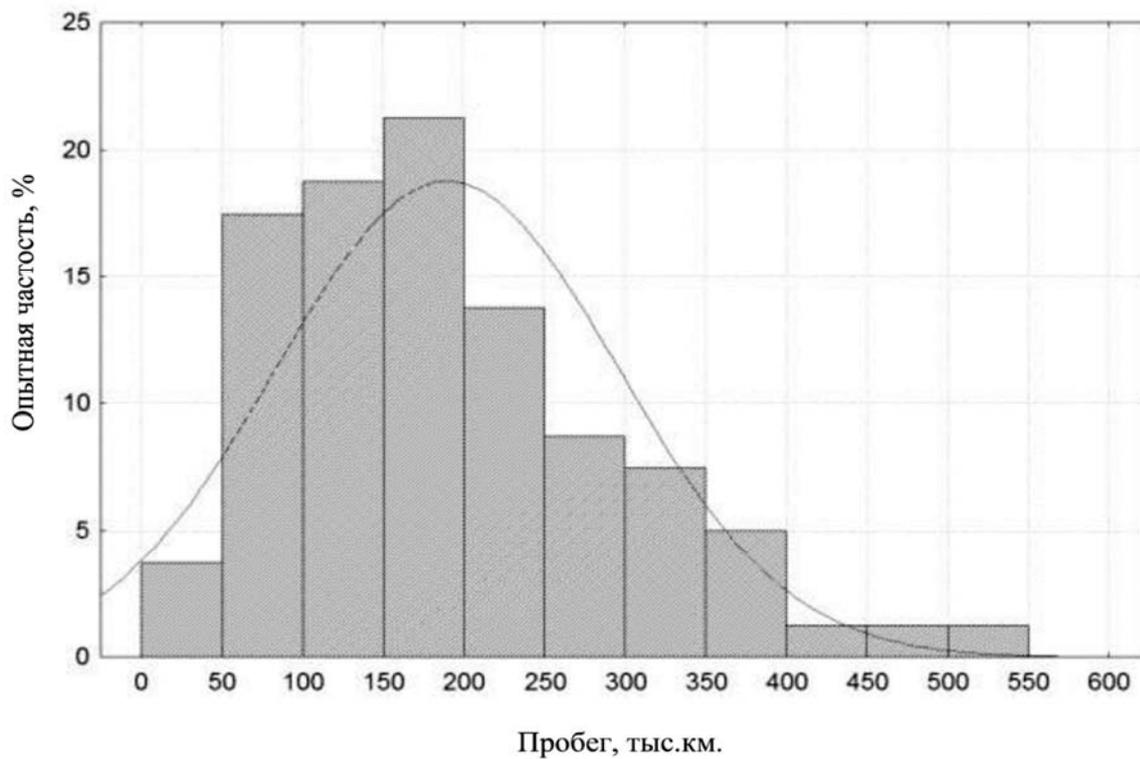


Рис. 6.4. Параметры распределения для новых валов

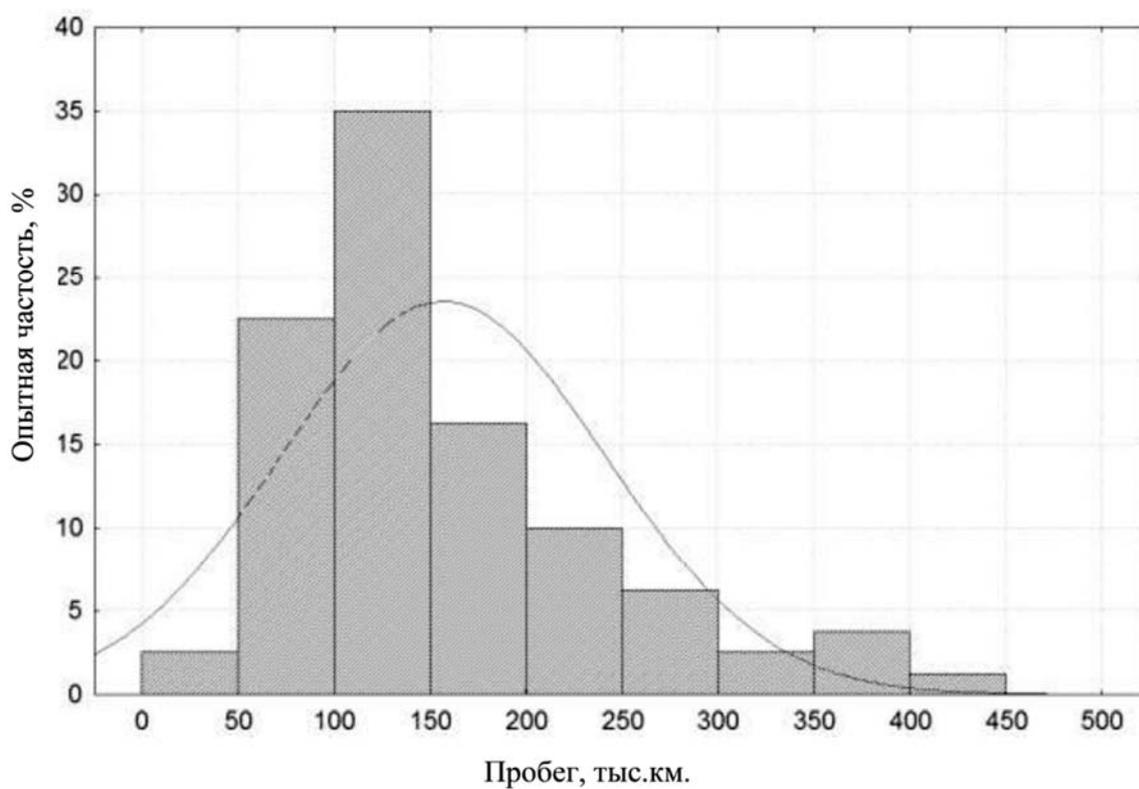


Рис. 6.5. - Параметры распределения для восстановленных валов

С учетом вышеизложенного, использование предложенного технологического процесса восстановления (рис.5.29) показывает, что стоимость восстановленного коленчатого вала будет в значительно ниже стоимости нового вала, а качество – сопоставимо.

Усовершенствование системы смазки турбокомпрессора позволило существенно повысить его надежность, а также надежность всего двигателя. В процессе эксплуатационных испытаний подконтрольных турбокомпрессоров с модернизированной системой смазки на 01.07.12 г. получены хорошие результаты по их работоспособности, пробег автомобилей составил 200000 км, доля отказов ТКР уменьшилась по сравнению с 2008 г. на 27%.

6.5. Выводы

1. Разработаны конструктивно – технологические мероприятия по повышению долговечности двигателя:

- создано новое измерительное устройство для определения прогиба шатуна, параллельности верхней и нижней головок шатуна, корсетности нижней головки шатуна (патент №68755), позволяющее повысить качество дефектовки;

- создано новое измерительное устройство для определения соосности коренных опор блока цилиндров (патент №104691), позволяющее повысить качество сборки блока цилиндров с коленчатым валом;

- усовершенствована технология восстановления коленчатых валов двигателей КамАЗ наплавкой под слоем флюса с последующим созданием на поверхности шеек плакирующего медного покрытия, выполняющего роль твердой смазки, что снижает вероятность задира шеек коленчатых валов;

- предложен новый способ нанесения электролитических железных покрытий при восстановлении автомобильных деталей (патент №2082835), позволяющий повысить качество поверхностей деталей формообразуемых электролитическим железным покрытием;

- усовершенствована технология восстановления коренных опор блока цилиндров, вневанным электролитическим осаждением железоникелевых покрытий, позволяющая снизить затраты на ремонт и повысить долговечность двигателей (патент №118427);

- создано устройство – автономная система смазки турбокомпрессоров, повышающая эксплуатационный ресурс турбокомпрессоров и двигателя в целом (патент № 93462).

2. Обоснованы пробеги автомобилей КамАЗ-Евро до предлагаемых видов ремонта по усовершенствованной структуре ЭРЦ форсированных двигателей (рис.6.1). Установлены предельные значения показателей

технического состояния исследуемых ресурсопределяющих элементов силового агрегата КамАЗ. С учетом этого предложена схема ремонта форсированных двигателей КамАЗ.

3. Использование предлагаемых мероприятий поддержания работоспособности форсированных силовых агрегатов уменьшило удельные затраты на их ремонт, снизило себестоимость работ на – 6%, увеличило производительность работ на 7%.

Экономический эффект от внедрения предлагаемых мероприятий поддержания работоспособности форсированных силовых агрегатов составит 63375 руб. на один двигатель в год.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Решена актуальная научно-практическая проблема, состоящая в повышении долговечности автомобильных двигателей и снижении затрат на обеспечение их работоспособности за счет предупреждения отказов и своевременного их устранения на основе прогнозирования технического состояния и управляемого формирования свойств поверхностей ресурсопределяющих деталей при восстановлении.

2. Сформулированы научные основы, методология повышения долговечности автомобильных двигателей, использование которых позволяет повысить эффективность эксплуатации автомобильного транспорта, что подтверждает значимость полученных результатов для экономики страны.

3. Обоснован комплекс экспоненциальных зависимостей (3.7), (3.14), (3.46), (3.47) показателей технического состояния силового агрегата от наработки, позволяющих прогнозировать их остаточный ресурс, а также закономерности формирования свойств поверхностного слоя деталей при восстановлении на основе их напряженно-деформированного состояния, которые необходимо учитывать при разработке технологического процесса восстановления.

4. Разработаны методология и комплекс измерительных средств для оценки показателей технического состояния основных элементов двигателей и оборудование для их восстановления.

5. Получены зависимости показателей технического состояния элементов двигателей от наработки в эксплуатационных условиях (параметры приведены в табл. 5.1, 5.3, 5.4, 5.5), которые с высокой степенью достоверности подтверждают справедливость аналитических зависимостей и используются для определения их предельного состояния (табл. 5.2).

6. Усовершенствованы технологии восстановления элементов двигателей:

– электролитическим осаждением железоникелевых покрытий в условиях контролируемого разрежения над зеркалом электролита, позволяющим получать равномерные осадки покрытия с меньшим припуском на механическую обработку и однородными физико-механическими свойствами;

– наплавочным металлопокрытием под слоем флюса с последующим созданием плакирующего медного покрытия на шейках коленчатых валов, играющего роль твердого смазочного материала, что позволяет предотвратить задиры шеек при критических условиях смазки. Данное покрытие рекомендуется наносить не только при восстановлении коленчатых валов, но и при замене вкладышей или при перешлифовке шеек

коленчатых валов под ремонтный размер, при текущем и капитальном ремонте двигателя.

7. Разработана концепция повышения долговечности турбокомпрессоров за счет автономной системы смазки, обеспечивающей их стабильное тепловое состояние на всех режимах работы двигателя.

8. Усовершенствована структура эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КамАЗ-Евро (рис.6.1), что позволило повысить долговечность (75-80%) и снизить удельные затраты на ремонт (75%), простои в ремонте (72%).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдонькин, Ф.Н. Методика определения оптимальной наработки двигателя до предупредительного ремонта [Текст] / Ф.Н. Авдонькин, А.С. Денисов, Р.Е. Колосов // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 1. – С. 7-8.
2. Авдонькин, Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1993. – 352 с.
3. Авдонькин, Ф.Н. Повышение срока службы автомобильных двигателей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – Саратов: Приволжск. кн. изд-во, 1969. – 278 с.
4. Авдонькин, Ф.Н. Прогнозирование изменения технического состояния подшипников коленчатого вала [Текст] / Ф.Н. Авдонькин, А.С. Денисов // Автомобильная промышленность. – 1975. – №7. – С. 4-5.
5. Авдонькин, Ф.Н. Текущий ремонт автомобилей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1978. – 269 с.
6. Авдонькин, Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1985. – 215 с.
7. Азаматов, Р.А. Восстановление деталей силового агрегата КамАЗ-740.11-240 (Еуго-1) [Текст] / Р.А. Азаматов, А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, П.Г. Курдин. – Набережные Челны: КамАЗтехобслуживание, 2007. – 307 с.
8. Анализ дефектов двигателей КамАЗ-740 при капитальном ремонте [Текст] / А.С. Денисов [и др.] // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию со дня рождения профессора А.Г. Рыбалко. – Саратов: СГАУ, 2006. – Т.3. -С. 19-25.
9. Анализ физико-механических свойств металла коленчатых валов, восстановленных нанесением наплавленных металлопокрытий [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Автотранспортное предприятие. – 2012. – №4. – С. 45-48.
10. Аналитические исследования выбега турбокомпрессора ДВС [Текст] / А.С. Денисов [и др.] // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. статей. – Саратов: СГТУ, 2010. – С.104-108.
11. Асоян, А.Р. Анализ деформаций и теплонапряженности корпуса турбокомпрессора двигателей КАМАЗ-ЕВРО [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, Н.В. Орлов // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. – 2011. – №3. – С. 21-24.
12. Асоян, А.Р. Анализ изменения технического состояния ресурсопределяющих элементов дизелей КАМАЗ в процессе эксплуатации [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.П. Захаров // Известия ВолгГТУ. – 2011. – №8. – С. 32-35.
13. Асоян, А.Р. Анализ напряженного состояния и геометрической формы верхней и нижней головок шатунов двигателя КамАЗ-Евро [Текст] /

А.Р. Асоян // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – № 1. – С. 3-8.

14. Асоян, А.Р. Анализ напряженно-деформированного состояния коренных опор блока цилиндров двигателя КамАЗ [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Суханкин // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 38-41.

15. Асоян, А.Р. Анализ работоспособности подшипникового узла турбокомпрессора в зависимости от технического состояния и режима работы [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Коркин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – №2. – С. 34-36.

16. Асоян, А.Р. Обеспечение работоспособности турбокомпрессоров автотракторных двигателей [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, А.Р. Асоян, А.А. Коркин. – Саратов: СГТУ, 2012. – 176 с.

17. Асоян, А.Р. Анализ технического состояния турбокомпрессоров и методы их ремонта [Текст] / А.Р. Асоян // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и других машин и пути их решения: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2005. – С.155 – 158.

18. Асоян, А.Р. Анализ факторов, влияющих на работоспособность подшипникового узла турбокомпрессора [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Коркин // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 44-49.

19. Асоян, А.Р. Аналитическая зависимость интенсивности изнашивания от зазора в подшипниках коленчатого вала [Текст] / А.С. Денисов, А.Р. Асоян, В.П. Захаров // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. статей. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 4-9.

20. Асоян, А.Р. Аналитические исследования выбега турбокомпрессора ДВС [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. статей. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 104-108.

21. Асоян, А.Р. Влияние условий электролиза на микроструктуру электролитического железа [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко, В.П. Шиловский // Восстановление и упрочнение деталей машин при ремонте: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1993. – С. 64 – 67.

22. Асоян, А.Р. Влияние разрежения над зеркалом электролита на внутреннее напряжение осадков электролитического железа [Текст] / А.Р. Асоян // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2000. – С. 99 – 102.

23. Асоян, А.Р. Влияние условий электролиза на геометрические характеристики железных покрытий [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко, В.Е. Карпенков // Технологическое формирование деталей при восстановлении и упрочнении: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1996. – С. 4 – 11.

24. Асоян, А.Р. Влияние элементов режима железнения на точность заготовок, формообразуемых при восстановлении изношенных деталей [Текст] / А.Р. Асоян, А.В. Митряков // Восстановление и управление качеством ремонта деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1999. – С. 85 – 96.

25. Асоян, А.Р. Восстановление нижних головок шатунов двигателей семейства КАМАЗ [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.М. Юдин // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2007. – С. 134 – 138.

26. Асоян, А.Р. Восстановление шатунов автотракторных двигателей [Текст] / А.С. Денисов, А.Р. Асоян, В.М. Юдин. – Саратов: СГТУ, 2008. – 100 с.

27. Асоян, А.Р. Изменение технического состояния основных элементов дизелей КамАЗ-ЕВРО в процессе эксплуатации / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.П. Захаров // Технологические и организационные проблемы сервиса машин и пути их решения: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 16-24.

28. Асоян, А.Р. Исследование адгезионной связи электролитических покрытий железа со сплавом 42 ХМФ-III [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко, А.М. Пашенных // Повышение эффективности восстановительной и упрочняющей технологии при ремонте машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1994. – С. 29 – 32.

29. Асоян, А.Р. Исследование зависимости шероховатости поверхности деталей с гальванопокрытиями, обработанными способом тангенциального резания от некоторых технологических факторов [Текст] / А.Р. Асоян, А.Н. Виноградов, Г.А. Боровиков // Повышение эффективности восстановительной и упрочняющей технологии при ремонте машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1994. – С. 49 – 60.

30. Асоян, А.Р. Повышение долговечности турбокомпрессоров форсированных двигателей [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, Н.В. Орлов // Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Москва, 2013. – С. 49-51.

31. Асоян, А.Р. Контроль макрогеометрических отклонений шатуна при ремонте, для повышения ресурса двигателя внутреннего сгорания [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.П. Захаров // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2011-№1(52) – С. 55-61.

32. Асоян, А.Р. Моделирование температуры подшипникового узла турбокомпрессора после остановки автомобильного двигателя / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Коркин [Текст] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – № 1. – С. 16-20.

33. Асоян, А.Р. Наводороживание слоя электролитического железа, формообразуемого в условиях контролируемого вакуума над зеркалом электролита [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко // Технологическое

формирование качества деталей при восстановлении и упрочнении: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1997. – С. 29 – 31.

34. Асоян, А.Р. Некоторые аспекты регулируемого турбонаддува [Текст] / А.Р. Асоян // Совершенствование технологий и организация обеспечения работоспособности машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2006. – С. 93–94.

35. Асоян, А.Р. Особенности технологии восстановления коренных опор блока цилиндров для повышения надежности дизельных двигателей [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Суханкин // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2009. – №3. – Вып.2. – С. 70– 74.

36. Асоян, А.Р. Оценка законов распределения диаметра заготовок, формообразуемых ЭЖП из изношенных деталей [Текст] / А.Р. Асоян, А.В. Митряков // Формирование свойств металлопокрытий при восстановлении и упрочнении деталей: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1995. – С. 12 – 16.

37. Асоян, А.Р. Оценка макрогеометрии нижней головки шатуна при ремонте/ А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.М. Юдин [Текст] // Проблемы транспорта и транспортного строительства: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2007. – С. 20 – 24.

38. Асоян, А.Р. Оценка работоспособности восстановленных деталей больших насосов ГМП автобусов ЛиАЗ [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко, А.С. Денисов // Поддержание и восстановление работоспособности транспортных средств: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Саратов: СГТУ, 1995. – С. 11-12.

39. Асоян, А.Р. Оценка ресурса опор блока цилиндров двигателей КамАЗ [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, А.А. Суханкин // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. статей. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 28-33.

40. Асоян, А.Р. Повышение качества вторичных заготовок, формообразуемых электролитическим железным покрытием [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1997. – С. 129-132

41. Асоян, А.Р. Повышение межремонтного ресурса коленчатых валов дизелей, восстановленных наплавкой под слоем флюса [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, Б.Ф. Тугушев // Мир транспорта и технологических машин. – 2011. – № 4. – С. 9-14.

42. Асоян А.Р. Повышение надежности подшипников коленчатого вала двигателя КАМАЗ при ремонте [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов // Научное обозрение. – Саратов: Саратов. гос. аграрн. ун-т. – 2012. – № 1. – С. 42-47.

43. Асоян, А.Р. Повышение технологической надежности деталей процесса железнения [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко // Концепция

развития и высокие технологии индустрии ремонта транспортных средств: тез. докл. Междунар. конф. – Оренбург, 1993. – С. 24 – 26.

44. Асоян, А.Р. Подвеска повышенной технологической надежности для нанесения гальванических покрытий на стержни клапанов [Текст] / А.Р. Асоян, А.В. Митряков // Технологическое формирование деталей при восстановлении и упрочнении: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1996. – С. 24 – 30.

45. Асоян, А.Р. Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения подвески с двусторонним независимым токоподводом для железнения стержней клапанов/ А.Р. Асоян, А.В. Митряков // Технологическое формирование качества деталей при восстановлении и упрочнении: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1997. – С. 26 – 29.

46. Асоян, А.Р. Метод восстановления опор блоков двигателей автомобилей [Текст] / А.Р. Асоян, Г.А. Боровиков // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2008. – С.120 – 122.

47. Асоян, А.Р. Совершенствование эксплуатационно-ремонтного цикла силового агрегата автомобиля на основе восстановительно-упрочняющих технологий, с учетом их технического состояния [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сб. тр. 70-й науч.-метод. и науч.-исслед. конф. – М.: МАДИ, 2012. – С. 175-179.

48. Асоян, А.Р. Теоретические предпосылки изменения технического состояния шатунов автотракторных двигателей в процессе эксплуатации [Текст] / А.Р. Асоян, В.М. Юдин, А.С. Денисов // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2008. – №3. – Вып.2. – С. 47 – 54.

49. Асоян, А.Р. Точность размеров, формы и качество поверхности заготовок, формообразуемых из изношенных деталей электролитическим железным покрытием [Текст] / А.Р. Асоян, А.В. Митряков // Формирование свойств металлопокрытий при восстановлении и упрочнении деталей: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1995. – С. 7 – 12.

50. Асоян, А.Р. Условия осаждения равномерных покрытий электролитического железа при восстановлении изношенных поверхностей деталей машин [Текст] / А.Р. Асоян // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2011. – №2. – С. 18-21.

51. Асоян, А.Р. Формирование структуры эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КамАЗ-ЕВРО [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.П. Захаров // Технологические и организационные проблемы сервиса машин и пути их решения: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 24-33.

52. Асоян, А.Р. Эксплуатационные испытания восстановленных больших насосов гидромеханических передач автобусов [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко // Повышение эффективности проектирования, испытания и

эксплуатации двигателей автомобилей, вездеходов, специальных строительных и дорожных машин: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 1994. – С. 7 – 8.

53. Асоян, А.Р. Электролитическое железнение в восстановительной и упрочняющей технологиях [Текст] / А.Р. Асоян, В.А. Бабенко // Отделочно-упрочняющая технология в машиностроении: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 1994. – С. 33 – 35.

54. Асоян, А.Р. Исследование влияния состояния ремонтного фонда на точность размеров и формы формообразуемой электролитическим железным покрытием заготовки [Текст] / А.Р. Асоян, А.В. Митряков // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1998. – С. 80-87.

55. Асоян, А.Р. Исследование процесса анодного растворения легированного железоуглеродистого сплава [Текст] / А.Р. Асоян, А.М. Пашенных // Восстановление и упрочнение деталей машин при ремонте: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1993– С. 75 -79.

56. Асоян, А.Р. Повышение качества заготовок, формируемых электролитическим железным покрытием [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.Р. Асоян. – Саратов, 1999. – 157 с.

57. Асоян, А.Р. Повышение эксплуатационной надежности силовых агрегатов автомобилей совершенствованием эксплуатационно-ремонтных циклов и технологий восстановления ресурсопределяющих деталей [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2012. – С. 379-381.

58. Балтенас, Р. Моторные масла. Производство. Свойства. Классификация. Применение [Текст] / Р. Балтенас, А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В. Шергалис. – М., СПб.: Альфа-Лаб., 2000. – 272 с.

59. Бабенко, В.А. Восстановление и упрочнение крупногабаритных деталей автомобилей, тракторов и других машин твердым электролитическим железом и сплавом железо-никель [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Бабенко. – Саратов, 1964. – 197с.

60. Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения [Текст] / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 253 с.

61. Беликов, Д. Грузовики обошли легковые автомобили [Электронный ресурс] /Дмитрий Беликов// Коммерсантъ-Online. – 2011. – Режим доступа: <http://kommersant.ru/doc/1589798>.

62. Белоглазов, С.М. Наводораживание стали при электрохимических процессах [Текст] / С.М. Белоглазов. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1975. – 412 с.

63. Бобанова, Ж.И. Восстановление деталей машин электрохимическим способом [Текст] / Ж.И. Бобанова, Л.И. Андреева. – Кишинев: Штиинца, 1984. – С. 22 – 28.

64. Бурумкулов, Ф.Х. Математическая модель усталостной долговечности коленчатых валов с учетом вероятности отказа [Текст] / Ф.Х. Бурумкулов, Л.М. Лельчук, В.А. Денисов // Труды ГОСНИТИ: сб. науч. тр. – М.: ГОСНИТИ, 1989. – Т. 86. – С. 24-30.

65. Быков, В.Г. Причины необратимых формоизменений тонкостенных вкладышей и пути повышения надежности подшипников высоконагруженных дизелей [Текст] / В.Г. Быков, М.А. Салтыков, М.Н. Горбунов // Двигателестроение. – 1980. – № 6. – С. 34-37.

66. Вагнер, Г. Основы исследования операций [Текст] / Г. Вагнер – М.: Мир, 1973. – 488 с.

67. Вадас, Э. Изготовление и ремонт деталей машин с пластиковым покрытием [Текст] / Э. Вадас; пер. с венг. С.П. Щевякова; под ред. А.Л. Левина. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.

68. Вайнер, Я.В. Технология электрохимических покрытий [Текст] / Я.В. Вайнер, М.А. Дасоян. – Л.: Машиностроение, 1972. – 464 с.

69. Вознесенский, В.А. Планирование эксперимента в технико-экономических исследованиях [Текст] / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.

70. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях [Текст] / В.А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.

71. Воробьев, Л.Н. Технология машиностроения и ремонта машин [Текст] / Л.Н. Воробьев. – М.: Высшая школа, 1981. – 298 с.

72. Восстановление постелей блоков двигателей автомобилей КАМАЗ [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Совершенствование технологий и организация обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2009. – С. 69 – 74.

73. Восстановление деталей автомобиля КамАЗ: [Текст] / Р.А. Азаматов [и др.]. – Набережные Челны: КамАЗ, 1994. – 215 с.

74. Вшивцев, В.В. Исследование динамической нагруженности шатуна с определением силы трения ЦПГ [Текст] / В.В. Вшивцев, В.В. Малышенко, В.Н. Никишин // Динамика и прочность автомобиля: тез. докл. Второго Всесоюз. науч.-техн. совещания. – М., 1986. – С. 70-71.

75. Вячеславов, П.М., Электролитическое формирование [Текст] / П.М. Вячеславов, Г.А. Воленюк. – Л.: Машиностроение, 1979. – 198 с.

76. Гальванотехника [Текст] / под ред. А.М. Гимберга. – М.: Металлургия, 1984. – 736с.

77. Гальванотехника благородных и редких металлов [Текст] / П.М. Вячеславов [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1970. – 248 с.

78. Гаркунов, Д.Н. Современные проблемы триботехники [Текст] / Д.Н. Гаркунов, А.А. Поляков, В.Я. Семенов // Трение и износ. – 1980. – №3. – С. 391-402.

79. Гаркунов, Д.Н. Триботехника [Текст] / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

80. Гафиятуллин, А.А. Обеспечение работоспособности шатунных подшипников автотракторных двигателей путем создания неразрывности масляного потока [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Гафиятуллин. – Саратов, 2005. – 130 с.

81. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.

82. Гнусин, Н.П. Шероховатость электроосажденных поверхностей [Текст] / Н.П. Гнусин, Н. Я. Коварский. – Новосибирск: Наука, 1970. – 235 с.

83. Гологан, В.Ф., Характер износа покрытий электролитического железа при сухом трении [Текст] / В.Ф. Гологан, Е.А. Мамонтов, Ю.Н. Петров // Повышение срока службы деталей машин электролитическими способами: труды Кишинев. сельхоз. ин-та. – Кишинев, 1968. – Т.54. – С. 71-77.

84. Горохов, В.А. Обработка деталей пластическим деформированием [Текст] / В.А. Горохов. – Киев: Техника, 1979. – 191 с.

85. Горский, В.Г. Планирование промышленных экспериментов [Текст] / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер, А.М. Талалай. – М.: Металлургия, 1978. – 112 с.

86. Горшенина, Е.Ю. Итальянский опыт восстановления коленчатых валов [Текст] / Е.Ю. Горшенина, Б.Ф. Тугушев // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2006. – С. 68-80.

87. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 54 с.

88. ГОСТ 8.050-73. – ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 14 с.

89. ГОСТ 8.051-81. – ГСИ. Погрешности, допустимые при измерении линейных размеров до 500 мм [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 10 с.

90. Григорьев, Л.Л. Рациональные варианты холодной штамповки. Техничко-экономические критерии [Текст] / Л.Л. Григорьев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 232 с.

91. Григорьев, М.А. Исследование критериев предельного состояния двигателей [Текст] / М.А. Григорьев, Е.П. Слабов // Автомобильная промышленность. – 1972. – № 12. – С. 8-10.

92. Григорьев, М. А. Износ и долговечность автомобильных двигателей [Текст] / М.А. Григорьев, Н.Н. Пономарев. – М.: Машиностроение, 1976. – 246 с.

93. Григорьев, М.А. Обеспечение надежности двигателей [Текст] / М.А. Григорьев, В.А. Долецкий. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 324 с.
94. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов [Текст] / С.Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, 1983. – 104 с.
95. Гурвич, И.Б. Долговечность автомобильных двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич. – М.: Машиностроение, 1967. – 103 с.
96. Гурвич И.Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич, П.Э. Сыркин, В.И. Чумак. – М.: Транспорт, 1994. – 144 с.
97. Гурвич, И. Б. Термодинамика тепловых двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич, А.А. Жданова. – Горький: ГПИ, 1980. – 64 с.
98. Гурвич, И.Б. Износ и долговечность двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1970. – 176 с.
99. Гурин, Ф.В. Технология автотракторостроения [Текст] / Ф.В. Гурин, В.Д. Клепников, В.В. Рейн. – М.: Машиностроение, 1981. – 295 с.
100. Гурьянов, Г. В. Электроосаждение износостойких композиций [Текст] / Г.В. Гурьянов. – Кишинев: Штиица, 1985. – 237 с.
101. Дажин, В.Г. Методы оценки надежности восстановленных деталей [Текст] / В.Г. Дажин // Вестник машиностроения. – 1976. – № 6. – С. 11-14.
102. Дажин, В.Г. Проблемы ремонта двигателей КамАЗ [Текст] / В.Г. Дажин, Г.К. Таруленков, В. А. Лукашевич // Автомобильный транспорт.– 1987.– № 10.– С. 49-51.
103. Дамаскин, Б.Б. Адсорбция органических соединений на электродах [Текст] / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, В.В. Батраков. – М.: Наука, 1968. – 323 с.
104. Дамаскин, Б.Б. Введение в электрохимическую кинетику [Текст] / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – М.: Высшая школа, 1983. – 179 с.
105. Данилов, И.К. Моделирование и оптимизация структуры эксплуатационно-ремонтного цикла ДВС [Текст] / И.К. Данилов. – Саратов: СГТУ, 2004. – 110 с.
106. Двигатели внутреннего сгорания: устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / под ред. М.Г. Круглова.– М. : Машиностроение, 1990.– 288 с.
107. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. Кн. 3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС [Текст] / под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова.– М. : Высшая школа, 2007.– 414 с.
108. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование [Текст]: учебник / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 1995. – 319 с.
109. Двигатели внутреннего сгорания: системы поршневых и комбинированных двигателей: учебник для вузов по специальности «Двигатели

внутреннего сгорания» [Текст] / С.И. Ефимов [и др.]; под общ. ред. А.С. Орлина, М. Г. Круглова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.

110. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин [Текст] / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

111. Демкин, Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей [Текст] / Н.Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 226 с.

112. Денисов, А.С. Анализ причин эксплуатационных разрушений шатунных вкладышей двигателей КамАЗ-740 [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков // Двигателестроение. – 1981. – №9. – С. 37-40.

113. Денисов, А. С. Изменение технического состояния двигателей при эксплуатации в доремонтном периоде [Текст] / А.С. Денисов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1982. – № 8. – С. 47-50.

114. Денисов, А.С. Анализ эксплуатационных режимов двигателей КамАЗ-740 [Текст] / А.С. Денисов, В.Н. Басков // Двигателестроение. – 1982. – № 6. – С. 41-43.

115. Денисов, А.С. Анализ этапов процесса проворачивания вкладышей коленчатого вала [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков // Повышение технической готовности автомобильного транспорта: межвуз. науч. сб. – Саратов: СПИ, 1985. – С. 14-18.

116. Денисов, А.С. Аналитическое исследование изменения условий смазки шатунных подшипников в процессе эксплуатации [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, А.А. Гафиятуллин, Д.Л. Панкратов // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2005. – №3. – С. 69-75.

117. Денисов, А.С. Диагностирование шатунных вкладышей двигателей КамАЗ [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков // Повышение эффективности использования автомобильного транспорта: межвуз. науч. сб. – Саратов: СПИ, 1986. – С.12-17.

118. Денисов, А.С. Изменение макрогеометрии нижней головки шатуна в процессе эксплуатации двигателя [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, В.М. Юдин // Проблемы транспорта и транспортного строительства: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2006. – С. 55-59.

119. Денисов, А.С. Изменение технического состояния двигателей в межремонтном периоде [Текст] / А.С. Денисов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1982. – № 9. – С. 47-49.

120. Денисов, А.С. Изменение условий смазки шатунных подшипников в процессе эксплуатации автомобильного дизеля / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков // Двигателестроение. – 1986. – №4. – С.4 4-46.

121. Денисов, А.С. Исследование теплового состояния турбокомпрессора ТКР7Н-1 двигателя внутреннего сгорания [Текст] / А. С. Денисов, А.М. Сычев, А.Ф. Малаховецкий // Проблемы теории, конструкции, проектирования и эксплуатации ракет, ракетных двигателей и наземно-механического оборудования к ним: труды постоянно действующего науч.-

техн. семинара. – Вып.35. – Саратов: Военно-артиллерийский ун-т, 2003. – С.102-104.

122. Денисов, А.С. Надежность автомобилей в различных условиях эксплуатации [Текст] / А.С. Денисов. – Саратов: СПИ, 1986. – 85 с.

123. Денисов, А.С. Обеспечение надёжности автотракторных двигателей [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков. – Саратов: СГТУ, 2007. – 422 с.

124. Денисов, А.С. Основы формирования эксплуатационно-ремонтного цикла автомобилей [Текст] / А.С. Денисов. – Саратов: СГТУ, 1999. – 352 с.

125. Денисов, А.С. Рациональный срок службы двигателей ЯМЗ-238 [Текст] / А.С. Денисов Р.Е. Колосов // Автомобильный транспорт. – 1978. – № 5. – С. 37-39.

126. Денисов, А.С. Изменение уровня ремонтпригодности коленчатого вала в процессе эксплуатации [Текст] / А.С. Денисов, О.А. Кулаков, А.Т. Кулаков // Технологические и организационные проблемы сервиса машин и пути их решения: сб. науч. тр. / СГТУ. – Саратов, 2010. – С. 39-43.

127. Денисов, А.С. Что дает предупредительный ремонт? [Текст] / А.С. Денисов, П.С. Беликов, И.К. Данилов // Автомобильный транспорт. – 1990. – № 5. – С. 35-37.

128. Денисов, А.С. Экспериментальная оценка деформации вкладышей подшипников коленчатого вала дизеля КамАЗ-740 [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, С.В. Сибиряков // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 24-27.

129. Денисов, А.С. Эффективный ресурс двигателей [Текст] / А.С. Денисов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. – 108 с.

130. Денисов А.С. Анализ отказов турбокомпрессора ТКН7Н-1 двигателей КамАЗ-740.11-240 [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, А.Ф. Малаховецкий // Актуальные проблемы транспорта Поволжья и пути их решения: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 60-62.

131. Денисов, А.С. Анализ надежности турбокомпрессоров ТКР7Н-1 двигателей КамАЗ-740.11-240 [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, А.Ф. Малаховецкий // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания: материалы межгосуд. науч.-техн. семинара. – Вып. 15. – Саратов.: СГАУ, 2003. – С. 67-74.

132. Дистлер, Г.И. Реальная структура кристаллов как фактор, определяющий процессы зародышеобразования и роста [Текст] / Г.И. Дистлер // Рост кристаллов. – М.: Наука, 1972. – Т. IX. – С. 201 – 209.

133. Добош, Д.А. Электрохимические константы [Текст] / Д.А. Добош; пер. с англ. и венг.; под ред. Я.М.Колотыркина. – М.: Мир, 1980. – 365 с.

134. Дорфман, Л.А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел [Текст] / Л.А. Дорфман. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. – 260 с.

135. Доценко, Н.И. Восстановление автомобильных деталей сваркой и наплавкой [Текст] / Н.И. Доценко. – М.: Транспорт, 1972. – 350 с.
136. Дюмин, И.Е. Проблема совершенствования ремонта и повышения эффективности использования автомобильных двигателей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / И.Е. Дюмин. – Харьков, 1979. – 388 с.
137. Дюмин, И.Е. Ресурс автомобильных двигателей и повышение эффективности его использования [Текст] / И.Е. Дюмин // Автомобильный транспорт. – 1983.– № 2. – С. 34-37.
138. Дюмин, И.Е. Современные методы организации и технологии ремонта автомобилей [Текст] / И.Е. Дюмин, В.А. Какуевицкий, А.С. Силкин. – Киев: Техника, 1970.– 519 с.
139. Ждановский, Н.С. Надёжность и долговечность автотракторных двигателей [Текст] / Н.С. Ждановский [и др.] – М.: Колос, 1974. – 233 с.
140. Ждановский, Н.С. Надежность и долговечность автотракторных двигателей [Текст] / Н.С. Ждановский, А.В. Николаенко. – Л.: Колос, 1981.– 295 с.
141. Жихарев, В.А. Механизмы ориентированного зародышеобразования и роста кристаллов при электроосаждении металлов [Текст] / В.А. Жихарев // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1992. – Т. 1. – № 1. – С. 9-13.
142. Зорин, В.А. Физические основы надежности машин [Текст] / В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 1981. – 102 с.
143. Иванов, В.Т. Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки [Текст] / В.Т. Иванов, В.Г. Гусев, А.Н. Фокин. – М.: Машиностроение, 1986. – 216 с.
144. Иванов, В. О сроках службы подшипников коленчатого вала двигателей ЗИЛ-130 [Текст] / В. Иванов, В. Прокопьев, Г. Крамаренко // Автомобильный транспорт. – 1972. – № 9. – С. 43-50.
145. Изменение технического состояния турбокомпрессоров в процессе эксплуатации [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Технологические и организационные проблемы сервиса машин и пути их решения: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 11-15.
146. Изотов, А.Д. Расчет нестационарно нагруженных подшипников [Текст] / А.Д. Изотов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 223 с.
147. Илларионов, В.А. Эксплуатационные свойства автомобиля [Текст] / В.А. Илларионов. – М.: Машиностроение, 1966. – 280 с.
148. Индикт, Е.А. Определение ресурса двигателя по техническим и экономическим критериям [Текст] / Е.А. Индикт, А.М. Шейнин // Автомобильная промышленность. – 1971.– №2. – С. 13-16.
149. Инженерная гальванотехника в приборостроении [Текст] /под ред. А.М. Гимберга. – М.: Машиностроение, 1977. – 512 с.

150. Исследование изменения технического состояния и надежности в процессе эксплуатации двигателей КамАЗ (Евро-1 и Евро-2) в Саратовской области и разработка рекомендаций по повышению эксплуатационной надежности: отчет по НИР заключительный / Руководитель А.С. Денисов. – Саратов: СГТУ, 2003. – 127с.

151. Исследование переходных тепловых процессов при остановке ДВС [Текст] / А.С. Денисов [и др.] // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 13-20.

152. Исследование ремонтпригодности коленчатых валов двигателей КамАЗ: техн. отчет НТЦ «КамАЗ». – Набережные Челны: КамАЗ, 2004. – 56 с.

153. Исследование теоретических основ электролиза металлов, применяемых для повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов отечественного и импортного производства с целью совершенствования разработок современных технологий: отчет о НИР (промежуточ.) по теме СПИ-50. – Саратов: СГТУ, 1993. – 46 с.

154. Исследование условий и особенностей формирования гальванических покрытий с улучшенными эксплуатационными характеристиками для восстановления и повышения износостойкости деталей машин отечественного и импортного производства: отчет о НИР по х/д 842/1. – Саратов: СГТУ, 1996. – 29 с.

155. Исследование физики процессов при формировании новых металлопокрытий, применяемых при восстановлении и упрочнении деталей машин и аппаратов. Исследование электрохимического и физического состояния поверхности при формировании электролитических металлопокрытий, применяемых при упрочняющей и восстановительной технологиях: отчет о НИР по теме СПИ-50 (промежуточ.) – Саратов: СГТУ, 1992. – 67 с.

156. Исследование физики процессов при формировании новых металлопокрытий, применяемых при восстановлении и упрочнении деталей машин и аппаратов. Исследование электрохимического и физического состояния поверхности при формировании электролитических металлопокрытий, применяемых при упрочняющей и восстановительной технологиях: отчет о НИР по теме СПИ-50(заключительн.) – Саратов: СГТУ, 1995. – 43 с.

157. Кабанов, Б.Н. Электрохимия металлов и адсорбция [Текст] / Б.Н. Кабанов. – М.: Наука, 1965. – 222 с.

158. Каданер, Л.И. Справочник по гальваностегии [Текст] / Л.И. Каданер. – Киев: Техника, 1976. – 252 с.

159. Каданер, Л.И. Равномерность гальванических покрытий [Текст] / Л.И. Каданер. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1961. – 414 с.

160. Казарцев, В.И. Ремонт машин [Текст] / В.И. Казарцев. – М.: Сельхозиздат, 1961. – 485 с.

161. Калашников, А.И. Восстановление и упрочнение деталей машин автоматической наплавкой в среде защитных газов [Текст] / А.И. Калашников. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 176 с.

162. Калмуцкий, В.С. Вероятностно-статистические закономерности повреждения и разрушения сталей с покрытиями [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / В.С. Калмуцкий. – Кишинев, 1983. – 452 с.

163. Калмуцкий, В.С. Статистические модели остаточных напряжений на базе традиционных планов эксперимента [Текст] / В.С. Калмуцкий, Б.В. Темрин // Ремонт деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин электрохимическими способами: сб. тр. – Кишинев, 1972. – Т. 87.– С. 35-43.

164. Капитальный ремонт автомобилей [Текст] / под ред. Р.Е. Есенберкина. – М.: Транспорт, 1989. – 335 с.

165. Каратышкин, С.Г. Динамически нагруженные подшипники судовых двигателей внутреннего сгорания [Текст] / С.Г. Каратышкин. – М.: Судостроение, 1968. 182 с.

166. Карнаухов, Б.Г. Микроскопические дефекты структуры электролитического никеля [Текст] / Б.Г. Карнаухов, В.А. Волотовская // Структура и механические свойства электролитических покрытий: тез. докл. – Тольятти, 1979. – С.153 – 155.

167. Карпенков, В.Е. Исследование способа твердого осталивания применительно к восстановлению цилиндров двигателей внутреннего сгорания [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Е. Карпенков. – Саратов, 1968. – 206 с.

168. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента [Текст] / П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1974. – 239 с.

169. Ковка и объемная штамповка стали / под ред. М.В. Сторожева. – М.: Машиностроение, 1967. – 448 с.

170. Колев, К.С. Технология машиностроения [Текст] / К.С. Колев. – М.: Высшая школа, 1977. – 256 с.

171. Колев, К.С. Точность обработки и режимы резания [Текст] / К.С. Колев. – М.: Машиностроение, 1976. – 237 с.

172. Колосов, Р.Е. Оптимальные сроки замены вкладышей коленчатого вала и поршневых колец двигателей ЯМЗ [Текст] / Р.Е. Колосов, А.С. Денисов // Автомобильная промышленность. – 1978. – № 3. – С. 5-7.

173. Комбалов, В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ [Текст] / В.С. Комбалов. – М.: Наука, 1974. – 112 с.

174. Коровчинский, М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения [Текст] / М.В. Коровчинский. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит., 1959.– 404 с.

175. Королев, А.В. Технологические основы обеспечения качества в условиях автоматизированного производства /А.В. Королев, А.Ф. Гуцин. – Саратов: СПИ, 1988. – 52 с.

176. Корсун, В.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий [Текст] / В.И. Корсун. – Макеевка: ДонГАСА, 2003. – 153 с.

177. Косилова, А.Г. Точность обработки заготовки и припуски в машиностроении: справочник технолога [Текст] / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков, М.А. Калинин. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.

178. Костецкий, Б.И. Надежность и долговечность машин [Текст] / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.И. Бершадский, А.К. Караулов. – Киев: Техника, 1975.– 408 с.

179. Костецкий, Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин [Текст] / Б.И. Костецкий. – Киев: Машгиз, 1959. – 478 с.

180. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах [Текст] / Б.И. Костецкий. – Киев: Техніка, 1970. – 296 с.

181. Костецкий, Б.И. Управление качеством и надежностью машин [Текст] / Б.И. Костецкий. – Киев: Техніка, 1979. – 83 с.

182. Костин, А.К. Работа дизелей в условиях эксплуатации: справочник [Текст] / А.К. Костин [и др.].– Л.: Машиностроение, 1989.– 284 с.

183. Косырев, С.П. Динамическое нагружение кривошипно-шатунного механизма дизелей [Текст] / С.П. Косырев // Двигателестроение. – 1980. – № 11. – С. 21– 23.

184. Кошкин, К. Работоспособность шатунных подшипников [Текст] / К. Кошкин, Э. Финкельштейн, А. Липкинд // Автомобильный транспорт. – 1972. – № 1. – С. 29-30.

185. Кошкин, К. Исследование зазора в коренных подшипниках двигателей ЗИЛ-130 [Текст] / К. Кошкин, Э. Финкельштейн, А. Липкинд // Автомобильный транспорт. – 1971. -№ 12. – С. 27-29.

186. Кузнецов, Е.С. Управление технической эксплуатацией автомобилей [Текст] / Е.С. Кузнецов. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.

187. Кузьмин, Н.А. Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации [Текст]: учеб. пособие / Н.А. Кузьмин. – Н. Новгород: НГТУ, 2002. – 142 с.

188. Кугель, Р.В. Надежность машин массового производства [Текст] / Р.В. Кугель. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

189. Кулаков, А.Т. Деформация шатунных вкладышей в процессе эксплуатации автомобильного дизеля [Текст] / А.Т. Кулаков, Е.С. Бурнашев // Повышение эффективности использования автомобильного транспорта: межвуз. науч. сб. – Саратов: СПИ, 1983. – С. 40-48.

190. Кулаков, А.Т. Нестабильность зазоров в шатунных подшипниках из-за образования прогиба вкладышей [Текст] / А.Т. Кулаков, А.С. Денисов // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2006.– №3.– С. 83-91.

191. Кулаков, А.Т. Разработка способа диагностирования шатунных подшипников двигателей и практических рекомендаций для снижения их отказов в процессе эксплуатации (на примере КамАЗ-740) [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.Т. Кулаков. – Саратов, 1986. – 173 с.
192. Кулаков, А.Т. Формирование ряда турбокомпрессоров для двигателей КамАЗ [Текст] / А.Т. Кулаков [и др.] // Совершенствование технологии и организации обеспечения работоспособности машин с использованием восстановительно– упрочняющих процессов: сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: СГТУ, 2003. – С. 31-34.
193. Куропяткин, И.И. Экономическая эффективность гальванического производства и перспективы его развития [Текст]: дис. ... канд. экон. наук / И.И. Куропяткин. – Минск, 1969. – 203 с.
194. Лавринович, Е. Предупредительный ремонт и ресурс двигателей [Текст] / Е. Лавринович, И. Ярошонок // Автомобильный транспорт. – 1978. -№ 1. – С. 38.
195. Левин, А. И. Теоретические основы электрохимии [Текст] / А.И. Левин. – М.: Металлургия, 1972 – 543 с.
196. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.
197. Лобанов, С.А. Практические советы гальванику [Текст] / С.А. Лобанов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 248 с.
198. Лукинский, В.С. Об оценке ресурса автомобильного двигателя по техническому критерию [Текст] / В.С. Лукинский // Автомобильная промышленность. – 1981.– № 1. – С. 5-6.
199. Лукинский, В.С. Определение надежности автомобильных двигателей [Текст] / В.С. Лукинский. – М.: НИИНавтопром, 1982. – 42 с.
200. Лукинский, В.С. Разработка методов обеспечения надежности большегрузных автомобилей на стадии проектирования [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / В.С. Лукинский. – Л., 1985.– 413 с.
201. Макарова, Н.А. Металлопокрытия в автомобилестроении [Текст] / Н.А. Макарова, М.А. Лебедева, В.Н. Набокова. – М.: Машиностроение, 1977. – 293 с.
202. Малаховецкий, А.Ф. Повышение безотказности турбокомпрессоров ТКР 7Н-1 [Текст] / А.Ф. Малаховецкий // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2004. – С. 8-13.
203. Малаховецкий, А.Ф. Повышение надежности турбокомпрессоров автотракторных двигателей путём снижения их теплонапряженности [Текст]: дис. ... канд. техн. наук /А.Ф. Малаховецкий. – Саратов, 2004. – 116 с.

204. Малянов, В.Н. Исследование условий повышения производительности вневанного проточного осталивания автомобильных деталей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Малянов. – М., 1972. – 26 с.
205. Масино, М.А. Организация восстановления автомобильных деталей [Текст] / М.А. Масино. – М.: Транспорт, 1981. – 176 с.
206. Маталин, А.А. Технология машиностроения [Текст] / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.
207. Маталин, А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов [Текст] / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 320 с.
208. Матвеев, А.Н. Молекулярная физика [Текст] / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1981. – 396 с.
209. Машиностроительное производство // Сер. Металлообрабатывающее оборудование: Обзорная информация. Повышение эксплуатационной надежности гибких производственных модулей [Текст]. – М.: ВНИИТЭМР, 1990. – Вып.1.– 48 с.
210. Мелков, М. П. Твердое осталивание автотракторных деталей [Текст] / М.П. Мелков. – М.: Автотрансиздат, 1962. – 274 с.
211. Мелков, М.П. Твёрдое осталивание автотракторных деталей [Текст] / М.П. Мелков. – М.: Транспорт, 1971. – 224 с.
212. Мелков, М.П. Восстановление автомобильных деталей твердым железом [Текст] / М.П. Мелков, А.Н. Швецов, И.М. Мелкова. – М.: Транспорт, 1982. – 198 с.
213. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. РДМУ 109-77 [Текст]. – М.: Стандарты, 1978. – 63 с.
214. Мирошников, Л.В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях [Текст] / Л.В. Мирошников, А.П. Болдин, В.И. Пал. – М.: Транспорт, 1977. – 263 с.
215. Митряков, А.В. Получение прочносцепляющихся электролитических железных покрытий [Текст] / А.В. Митряков. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1988. – 184 с.
216. Митряков, А.В. Восстановление деталей железнением [Текст] / А.В. Митряков. – Саратов: СГТУ, 2005. – 224 с.
217. Митряков, А.В. Надежность восстановительной технологии (анализ, синтез, прогнозирование) [Текст] / А.В. Митряков. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 184 с.
218. Митряков, А.В. Основы обеспечения надежности восстановительной технологии [Текст] / А.В. Митряков. – Саратов: СПИ, 1989. – 394 с.
219. Митряков, А.В. Технологическое проектирование механизированных и автооператорных линий железнения [Текст] / А.В. Митряков. – Саратов: СПИ, 1992. – 188 с.

220. Михайлов, А.А. Обработка деталей с гальваническими покрытиями [Текст] / А.А. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1981. – 144 с.

221. Михлин, В.М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники [Текст] / В.М. Михлин. – М.: Колос, 1984. – 335 с.

222. Мошкович, Ю.Д. Структура и физико-механические свойства композиционных электрохимических покрытий на основе железа и хрома [Текст] / Ю.Д. Мошкович, Б.Я. Баксман // Восстановление изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями: сб. науч. тр. – Кишинев: КСИ, 1982. – С. 40 – 44.

223. Никишин, В.Н. Обеспечение качества коленчатого вала автомобильного дизеля [Текст] / В.Н. Никишин [и др.] // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2006. – № 4. – С. 69-76.

224. Никишин, В.Н. Формирование и обеспечение качества автомобильного дизеля [Текст] / В.Н. Никишин. – Набережные Челны: Изд-во Камской гос. инж.-экон. акад., 2006. – 456 с.

225. Обеспечение работоспособности турбокомпрессоров автотракторных двигателей [Текст] / А.С. Денисов [и др.]. – Саратов. СГТУ, 2012. – 176 с.

226. Обоснование необходимости дефектовки коренных опор блоков цилиндров при капитальном ремонте автомобильных двигателей и восстановления их упрочняющими технологиями [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Современные технологии в машиностроении: материалы 14-й Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПДЗ, 2010. – С. 379-381.

227. Объемное моделирование и анализ деформации коренных опор двигателя КАМАЗ– 740 [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Проблемы геометрического компьютерного моделирования в подготовке конструкторов для инновационного производства: сб. материалов Поволжской науч.-метод. конф. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 183-188.

228. Оптимизация технологических процессов в гальванотехнике [Текст] / А.М. Гинберг [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 128 с.

229. Организация капитального ремонта автомобилей [Текст] / под общ. ред. Н.Н. Маслова. – М.: Техника, 1977. – 320 с.

230. Орлов, В.Ф. Электрохимическое формообразование [Текст] / В.Ф. Орлов, Б.И. Чугунов. – М.: Машиностроение, 1990. – 239 с.

231. Орлов, П.И. Основы конструирования [Текст] / П.И. Орлов. – М.: Машиностроение, 1977. – Т. 2. – 573 с.

232. Основы трибологии (трение, износ, смазка) [Текст]: учебник для технических вузов / под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.

233. Оценка сопротивления усталости и триботехнической работоспособности ремфонда коленчатых валов двигателей КамАЗ-740, имеющих трещины, задиры и прогибы с выдачей рекомендаций о возможности использования этих валов: отчет НТЦ «КамАЗ» и ВНПО «Ремдеталь»

[Текст] / руководитель Ф.Х. Бурумкулов. – М.: ВНПО «Ремдеталь», 1990. – 150 с.

234. Оценка эффективности гидроаккумулятора для смазки турбокомпрессора [Текст] / А.С. Денисов [и др.] // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2010. – №2. – С. 63-68.

235. Пат. 118427 РФ, МПК G01B5/25. Устройство для нанесения электролитических железных покрытий при восстановлении коренных опор блоков цилиндров автомобильных двигателей [Текст] / Денисов А.С., Асоян А.Р., Суханкин А.А.; патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.». – 2012100333/28; заявл. 10.01.2012; опубл. 20.07.2012. – 4 с.

236. Пат. 104691 РФ, МПК G01B5/00. Устройство для определения несоосности коренных опор блока цилиндров [Текст] / Денисов А.С., Асоян А.Р., Суханкин А.А.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет». – №201015426/28; заявл. 29.12.2010; опубл. 20.05.2011. – 5 с.

237. Пат. 93462 РФ, МПК F01M5/00. Система смазки турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Денисов А.С., Асоян А.Р., Сиягин А.С.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет». – №2009146742/22; заявл. 17.12.2009; опубл. 27.04.2010. – 4 с.

238. Пат. 2082835 РФ, МПК⁶ C25D3/20, C25D5/00. Способ электролитического железнения [Текст] / Бабенко В.А., Пашенных А.М., Асоян А.Р.; заявитель и патентообладатель Саратовский государственный технический университет. – №95103128/02; заявл. 06.03.1995; опубл. 27.06.1995. – 6 с.

239. Пат. 68755 РФ, МПК G21B3/00. Устройство для проверки геометрии шатунов двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Денисов А.С., Асоян А.Р., Юдин В.М.; патентообладатель Денисов А.С. – №2007106803/22; заявл. 22.02.2007; опубл. 27.11.2007. – 4 с.

240. Пашенных, А.М. Исследование условий получения осадков электролитического железа в проточном электролите применительно к восстановлению внутренних поверхностей автомобильных деталей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.М. Пашенных. – Саратов, 1965. – 183 с.

241. Петров, Ю.Н. Электролитическое осаждение железа [Текст] / Ю.Н. Петров [и др.] – Кишинев: Изд-во АН Молдавской ССР, 1990. – 194 с.

242. Плесков, Ю.В. Вращающийся дисковый электрод [Текст] / Ю.В. Плесков, В.Ю. Филиповский. – М.: Наука, 1972. – 343 с.

243. Плеханов, И.Ф. Расчет и конструирование устройств для нанесения гальванических покрытий [Текст] / И.Ф. Плеханов. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.

244. Плешко, Е.Д. Износостойкость гальванических покрытий при трении со смазкой [Текст] / Е.Д. Плешко, Д.М. Эрлих, А.Д. Кетрарь // Восстановление изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями: межвуз. науч. сб. – Кишинев: Кишинев. сельскохоз. ин-т, 1982. – С.60-63.

245. Пляскин, И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении [Текст] / И.И. Пляскин. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с.

246. Поверхностно-активные вещества: справочник [Текст] / под ред. А.А. Абрамцева, Г.М. Гаевого. – Л.: Химия, 1979. – 376 с.

247. Поветкин, В.В. Структура электролитических покрытий [Текст] / В.В. Поветкин, И.М. Ковенский. – М.: Metallургия, 1989. – 135 с.

248. Повышение надежности турбокомпрессоров модернизацией системы смазки [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Авто Транспортное Предприятие. – 2011. – №2. – С. 48-51.

249. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров ТКР 7Н [Текст] / А.С. Денисов [и др.] // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2004. – №4. – С. 67-74

250. Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта [Текст] / Мин-во автомобильного транспорта РСФСР. – М.: Транспорт, 1986. – 73 с.

251. Поперека, М.Я. Внутренние напряжения электролитически осаждаемых металлов [Текст] / М.Я. Поперека. – Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1966. – 335 с.

252. Попык, К.Г. Автомобильные и тракторные двигатели [Текст] / К.Г. Попык, К.И. Сидорин, А.В. Костров. – М.: Высшая школа, 1976. – 280 с.

253. Построение гистограмм распределения с неровными интервалами значений признака по оси абсцисс [Текст]: метод. указ. для самост. раб. студ. / сост. А.В. Митряков. – Саратов: СПИ, 1995. – 7 с.

254. Потенциал функционального тюнинга грузовых автомобилей [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Грузовик. – 2012. – №5. – С. 17-19.

255. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения [Текст]. – М.: ГОССТАН – ДАРТ СССР, 1974. – 20 с.

256. Причины и устранение случаев задира и проворачивания вкладышей подшипников коленчатого вала автомобильного дизеля КамАЗ [Текст] / В.Н. Барун [и др.] // Двигателестроение. – 1983. – №4. – С. 3-5.

257. Промежуточный отчет по теме СПИ-50 [Текст]. – Саратов: СГТУ, 1992. – 67 с.

258. Проников, А.С. Надежность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.

259. Протасов, Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности [Текст] / Б.В. Протасов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 152 с.

260. Пустыльник, Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений [Текст] / Е.И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

261. РД 50-90-86 Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 84 с.

262. Результаты термометрирования вкладышей подшипников коленчатого вала двигателя КамАЗ-740: техн. отчет НТЦ «КамАЗ» [Текст]. – Набережные Челны, 1989. – 43 с.

263. Ремонтпригодность машин [Текст] / под ред. П.Н. Волкова. – М.: Машиностроение, 1975. – 368 с.

264. Риппел, Г. Проектирование гидравлических подшипников [Текст] / Г. Риппел. – М.: Машиностроение, 1967. – 136 с.

265. Розенберг, Р.В. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин [Текст] / Р.В. Розенберг. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.

266. Ротинян, А.Л. Теоретическая электрохимия [Текст] / под ред. А.Л. Ротиняна. – Л.: Химия, 1981. – 424 с.

267. Руденко, П.А. Проектирование и производство заготовок в машиностроении [Текст] / П.А. Руденко [и др.]. – Киев: Вища школа, 1991. – 247 с.

268. Рузинов, Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов [Текст] / Л.П. Рузинов. – М.: Химия, 1972. – 200 с.

269. Руководства по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту. Двигатели КамАЗ: 740.11-240, 740.13-260, 740.14-300, 740.30-260, 740.50-360, 740.57-320, 740.50-3901001КД [Текст]. – Набережные Челны: ОАО «КамАЗ», 2002. – 247 с.

270. Румшисский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] / Л.З. Румшисский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

271. Савельев, Г.М. Повышение эксплуатационной надежности автомобильных дизелей ЯМЗ с турбонаддувом [Текст] / Г.М. Савельев, Б.Ф. Лямцев, Е.П. Слабов; Министерство автомобильной промышленности СССР. Ин-т повышения квалификации руководящих работников и специалистов автомобильной промышленности. – М., 1988. – 118 с.

272. Савельев, Г.М. Турбокомпрессоры и теплообменники надувочного воздуха автомобильных двигателей [Текст] / Г.М. Савельев, Е.Н. Зайченко; Министерство высшего и среднего специального образования СССР. Ин-т повышения квалификации руководящих работников и специалистов

автомобильной промышленности. – Ярославль: Верхне-Волжское книжн. изд-во, 1983. – 96 с.

273. Савельев, Н.М. Определение оптимального содержания хлористого железа в электролите осталивания [Текст] / Н.М. Савельев // Централизованное восстановление деталей машин. – Саратов: ЦНТИ, 1969. – С. 220–228.

274. Самаренкин, А.К. Позиция ОАО «КАМАЗ» на рынке сервиса [Текст] / А.К. Самаренкин // Вестник КАМАЗа. – Набережные Челны, 2004. – С. 24–27.

275. Сведения по двигателям EURO-2 производства ОАО «КАМАЗ-Дизель» с рекламациями по разрушению турбокомпрессоров ТКР7С-6 за 2006 год / ОАО «КАМАЗ – Дизель» [Текст]. – Набережные Челны, – 2007. 19 с.

276. Селезнев, К.П. Теория и расчет турбокомпрессоров [Текст] / К.П. Селезнев, Ю.С. Подобуев, С.А. Анисимов. – Л.: Машиностроение, 1968. – 406 с.

277. Скорчеллетти, В.В. Теоретическая электрохимия [Текст] / В.В. Скорчеллетти. – Л.: Химия, 1969. – 608 с.

278. Слабов, Е.М. Необходимость предупредительного ремонта двигателей ЯМЗ-238 [Текст] / Е.М. Слабов, М.А. Григорьев // Автомобильный транспорт. – 1971. – № 5. – С. 24–25.

279. Совершенствование технологии восстановления нижней головки шатуна двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Совершенствование технологий и организация обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2009. – С. 110–118.

280. Совершенствование технологии ремонта нижней головки шатуна двигателя [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2008. – №3. – С. 12 – 15.

281. Современные технологические процессы получения высококачественных изделий методом литья и порошковой металлургии [Текст]: науч.-практ. конф. – Чебоксары: ЧГУ, 1989. – 261 с.

282. Солонин, И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения [Текст] / И.С. Солонин. – Машиностроение, 1972. – 216 с.

283. Справочник технолога авторемонтного производства [Текст]. – М.: Транспорт, 1977. – 432 с.

284. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т.1 [Текст] / под ред. А.Г. Косимовой, Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 656 с.

285. Темрин, Б.В. Остаточные напряжения в электролитических железных покрытиях [Текст] / Б.В. Темрин, Л.И. Дехтярь // Повышение надежности и долговечности деталей машин электролитическими покрытиями. – Кишинев: Кишинев. сельскохоз ин-т, 1970. – Т. 59. – С. 79 – 83.

286. Теоретический анализ изменения напряженно-деформированного состояния коленчатого вала в процессе эксплуатации [Текст] /А. С. Денисов [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 9. – С. 47-51.
287. Теория вероятностей: справочник по теории вероятности и математической статистике [Текст] /под ред. В.С. Королюка. – Киев: Наукова думка, 1978. – 583 с.
288. Титунин, Б.А. Ремонт автомобилей КамАЗ [Текст] / Б.А. Титунин [и др.]. – Л.: Агропромиздат; Ленингр. отд-ние, 1987. – 288 с.
289. Точность производства в машиностроении и приборостроении [Текст] / под ред. А.Н. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.
290. Транспортная стратегия Российской Федерации [Текст]. – М.: Транспорт, 2003. – 28 с.
291. Третьяков, А.И. Исследование микротвердости железных электролитических покрытий [Текст] / А.И. Третьяков, П.Р. Пепчук // Эксплуатация и ремонт сельскохозяйственной техники: сб. науч. тр. – Ростов-н/Д.: Изд-во Ростов. ун-та, 1977. – С. 74 – 77.
292. Трифонов, О.Н. На стадии проектирования [Текст] / О.Н. Трифонов // Стандарты и качество. – 2001. – № 4. – С. 47.
293. Троицкий, А.И. Предупредительный ремонт машин [Текст] / А.И. Троицкий, С.П. Бирюков // Ресурсосберегающие технологические процессы технической эксплуатации автомобилей: сб. науч. тр. – М.: МАДИ, 1987. – С. 40-44.
294. Тугушев, Б.Ф. «The Gleason Process» для восстановления коленчатых валов [Текст] / Б.Ф. Тугушев // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 91-103.
295. Тугушев, Б.Ф. Американская концепция восстановления тяжело-нагруженных коленчатых валов дизельных двигателей [Текст] / Б.Ф. Тугушев // Актуальные проблемы транспорта Поволжья и пути их решения: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С.136-149.
296. Тугушев, Б.Ф. Анализ японского опыта восстановления коленчатых валов [Текст] / Б.Ф. Тугушев // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и других машин и пути их решения: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2005. – С. 84-89.
297. Тугушев, Б.Ф. Комплекты для наплавки коленчатых валов фирмы “Gleason Engineering Industries, Inc.” (США) [Текст] / Б.Ф. Тугушев // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 85-91.
298. Тугушев, Б.Ф. Мировая практика восстановления коленчатых валов [Текст] / Б.Ф. Тугушев // Восстановление и упрочнение деталей машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 69-85.
299. Тупаков, А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей [Текст] / А.П. Тупаков. – М.: Машиностроение, 1979.– 184 с.

300. Фасхиев, Х.А. Проблемы качества в автомобилестроении [Текст] / Х.А. Фасхиев, О.А. Ситникова // Машиностроитель. – 2000. – № 1. – С. 34-39.

301. Фасхиев, Х.А. Показатели конкурентоспособности и качества грузовых автомобилей [Текст] / Х.А. Фасхиев, И.М. Костин // Стандарты и качество. – 2003. – № 4. – С. 56-60.

302. Фасхиев, Х.А. Качество – основа выживания автомобильной промышленности [Текст] / Х.А. Фасхиев // Стандарты и качество. – 2001. – № 4. – С. 66-68.

303. Финкельштейн, Э.С. Исследование надежности подшипников автомобильных дизелей [Текст] / Э.С. Финкельштейн // Надежность и контроль качества. – 1971. – № 9. – С. 69-74.

304. Финкельштейн, Э. Причины преждевременных повреждений подшипников отремонтированных двигателей [Текст] / Э. Финкельштейн, А. Соболев, Ю. Фролов // Автомобильный транспорт. – 1966. – № 3. – С. 38-41.

305. Фрейсан, Л. М. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях электролитической защиты [Текст] / Л.М. Фрейсан, В.А. Марков, И.Е. Брыскин. – Л.: Химия, 1972. – 239 с.

306. Хабибуллин, Р.Б. Повышение эффективности функционирования системы фирменного сервиса грузовых автомобилей на основе инновационных научно-технических разработок [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Р.Б. Хабибуллин. – Орел, 2012. – 473 с.

307. Хак, Г. Турбодвигатели и компрессоры [Текст]: справ. пособие / Г. Хак, К. Лагкабель. – М.: ООО «Изд-во Артель»: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 351 с.

308. Хрущев, М. Исследование изнашивания металлов [Текст] / М.М. Хрущев, Е.С. Беркович. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 350 с.

309. Целесообразность диагностирования турбокомпрессоров в процессе эксплуатации с целью повышения надежности силового агрегата [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Совершенствование технологий и организаций обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2011. – С. 11-15.

310. Чайнов, Н.Д. Конструирование двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н.Д. Чайнов [и др.] -М.: Машиностроение, 2008. – 496 с.

311. Чайнов, Н.Д. Расчет теплового и напряженно-деформированного состояния деталей ДВС на ЭВМ [Текст]: учеб. пособие по курсу «Конструкция и расчет поршневых и комбинированных ДВС» / Н.Д. Чайнов, Н.А. Иващенко. – М.: МВТУ, 1982. – 302с.

312. Чайнов, Н.Д. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей [Текст] / Н.Д. Чайнов [и др.] – М.: Машиностроение, 1977. – 153 с.

313. Черкез, М.Б. Хромирование [Текст] / М.Б. Черкез, Л.Я. Богорад. – Л.: Машиностроение, 1977. – 90 с.

314. Чихос, Х. Системный анализ в трибонике [Текст] / Х. Чихос. – М.: Мир, 1982. – 351 с.

315. Чугаев, Р.Р. Гидравлика / [Текст] Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

316. Шадричев, В.А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлопокрытиями [Текст] / В.А. Шадричев. – М.-Л.: Машгиз, 1962. – 296 с.

317. Шадричев, В.А. Основы технологии автостроения и ремонт автомобилей [Текст] / В.А. Шадричев. – Л.: Машиностроение, 1976. – 560 с.

318. Шайдулин, В.М. Опыт внедрения технологических процессов восстановления деталей машин гальваническими покрытиями [Текст] / В.М. Шайдулин, Е.Д. Плешко // Новые технологические процессы восстановления деталей машин: сб. науч. тр. / АН МССР. – Кишинев: Штиица, 1988. – С. 27 – 33.

319. Шампайн, Л.Ф. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием MATLAB [Текст]: учеб. пособие / Л.Ф. Шампайн, И. Гладвел, С. Томпсон. – СПб.: Лань, 2009. – 304 с.

320. Шаповалов, В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродных сплавов [Текст] / В.И. Шаповалов. – М.: Metallurgia, 1982. – 232 с.

321. Шатров, Н.И. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей [Текст] / Н.И. Шатров. – М.: Машиностроение, 1980. – 159 с.

322. Швец, И.Т. Динамика тепловых процессов стационарных газотурбинных установок (Элементы анализа и расчета) [Текст] / И.Т. Швец. – Киев, 1972. – 279 с.

323. Швецов, А.Н. О торможении трещин в покрытиях твердого железа [Текст] / А.Н. Швецов // Структура и технические свойства электролитических покрытий: тез. докл. – Тольятти, 1979. – С.162 – 164.

324. Швецов, А.Н. Основы восстановления деталей оставиванием [Текст] / А.Н. Швецов. – Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1973. – 143 с.

325. Шейнин, А.М. Основные принципы управления надежностью машин в эксплуатации [Текст] / А.М. Шейнин. – М.: Знание, 1977. – Вып. 1. – 97 с.; вып. 2. – 42 с.

326. Шор, Л.Л. Исследование влияния выделения газа в процессе ЭХО на режим движения электролита и гидравлическое сопротивление межэлектродного зазора [Текст] / Л.Л. Шор, Ю.Н. Петров, М.А. Бухбиндер // Ремонт деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин электролитическими способами. – Кишинев: Кишинев. сельскохоз. ин-т, 1972. – Т.87. – С. 88-92.

327. Шор, Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности [Текст] / Я.Б. Шор. – М.: Советское радио, 1962. – 552 с.

328. Шор, Я.Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / [Текст] Я.Б. Шор, Ф.М. Кузьмин. – М.: Радио, 1968. – 288 с.
329. Штернберг, А.А. Морфология, кинетика и механизм роста кристаллов [Текст] / А.А. Штернберг // Рост кристаллов. – М.: Наука, 1972. – Т.9. – С. 34 – 41.
330. Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества [Текст] / Р. Шторм. – М.: Мир, 1970. – 368 с.
331. Эксплуатационная надежность сельскохозяйственных машин [Текст] / под ред. В.Д. Аниловича. – Минск: Ураджая, 1974. – 263 с.
332. Bathe K.-J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis / K.J. Bathe. – Prentice Hall 1996. – 223 p.
333. Gawne D.T. Failure of electrodeposited chromium coatings on cast iron substrates / D.T. Gawne // Metallurgical and protective coatings – 1984. – P.385-393.
334. Forkel E. Galvanische Eisenauftragung auf Außen- und Innenflächen / E. Forkel, R. Muller // Agrartechnik. – 1981. – №10. – S. 276-278.
335. Introduction to stress analysis by the photostress method. Tech Note 702. North Carolina: Vishay Measurements Group, Inc. Raleigh, 1989.
336. Kango Sakai. Development of new electroplating process using the liquid cushion cell / Sakai Kango, Nitto Hajime // Iron and Steel Engineer. – 1985. – №62 – P. 49-52.
337. Shingo Nomura. Zn-Fe/Zn-Ni Double-layer electroplated steel sheet / Nomura Shingo, Sakai Hirohiko // Technical Report. – 1983. – №23. – P. 930-938.
338. Vaclav Landa. Možnosti využití galvanických slitinových povlaku typu Ni-Fe pro renovaci strojních součástí / Landa Vaclav, Vitek Jaromir // Strojirensrř výroba. – 1985. – № 7. – S 832-835.
339. Campbell Y. The development and testing of engine bearings / Y. Campbell // IAAE Journal. – 1964. – Vol. 24. – № 11-12. – P. 182-193.
340. Johnson G. Failure of components / G. Johnson // Automobile Engineers. – March, 1996. – P. 108-111.
341. Martin F.A. Developments in engine bearings / F.A. Martin // Tribol Retiprocat. Engines. Proc. 9-th Leeds-Lyon Symp. Tribol 7-10 sept. 1982. – P. 9-28.
342. Vocel M. Treni a opotrebeni strojních součástí / M. Vocel, V. Dufecakol. Praha: SNTL, 1976. – 374 p.
343. Cocks M. Sliding Contacts in Rolling Bearing / M. Cocks, T. Tallian // ASLE Trans. – 1971. – Vol. 14. – № 1. – P. 182-193.
344. Johnson G. Failure of components / G. Johnson // Automobile Engineers. – March, 1996. – P. 108-111.
345. Krause H. R. Tribomechanical Reaction in the Friction and Wearing Process of Iron / H.R. Krause // Wear. – 1971. – Vol. 18. – № 3. – P. 403-412.
346. Moore D. F. Principles and Applications of Tribology / D.F. Moore. – Pergamon Inter. Library, 1975. – 271 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1. Анализ изменения технического состояния силовых агрегатов в процессе эксплуатации	10
1.1.1. Изнашивание деталей	12
1.2. Изменение геометрической формы элементов силовых агрегатов автомобилей в процессе эксплуатации	25
1.3. Анализ дефектов основных элементов деталей двигателя КамАЗ-740	27
1.3.1. Анализ дефектов коленчатого вала	27
1.3.2. Анализ дефектов блоков цилиндров	35
1.3.3. Анализ дефектов шатунов	38
1.3.4. Анализ дефектов турбокомпрессоров	40
1.4. Обоснование необходимости совершенствования структуры эксплуатационно-ремонтного цикла двигателей КамАЗ	47
1.5. Выводы, цель и задачи исследования	51
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	53
2.1. Программа и общая методика исследования	53
2.2. Методика аналитического исследования	55
2.3. Методика измерения деталей	57
2.3.1. Методика оценки состояния турбокомпрессоров	59
2.3.2. Методика измерения температуры элементов турбокомпрессоров	60
2.3.3. Методика проведения испытаний автономной системы смазки турбокомпрессора	61
2.4. Методика электрохимических исследований	62
2.4.1. Методика исследования структурных преобразований в электролитическом железе	65
2.4.2. Методика исследования адгезионной связи покрытий электролитического железа с основой	66
2.5. Методика исследования равномерности распределения толщины электролитического железного покрытия	66
2.6. Методика определения трибологических характеристик	69
2.7. Методика стендовых моторных исследований	70
2.8. Методика эксплуатационных исследований	71
2.9. Выводы	72

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ	73
3.1. Анализ условий развития процессов изнашивания основных элементов двигателя	74
3.1.1. Изменение технического состояния шатуна	74
3.1.2. Изнашивание верхней и нижней головок шатуна в процессе эксплуатации.....	75
3.1.3. Анализ напряженно-деформированного состояния шатуна в процессе эксплуатации	80
3.2. Изменение технического состояния коленчатого вала	84
3.3. Изменение технического состояния опор блока цилиндров	96
3.4. Изменение технического состояния турбокомпрессора	102
3.5. Выводы	114
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ	116
4.1. Формирование металлопокрытий электролитического железа в условиях контролируемой разреженной атмосферы	116
4.1.1. Формирование структуры электролитического железа	116
4.2. Исследование электрохимического состояния осаждаемой поверхности детали при начальной катодной поляризации в условиях разреженной атмосферы.....	127
4.3. Исследование структурных преобразований в электролитическом железе	129
4.4. Исследование адгезионной связи покрытий железа с восстанавливаемой поверхностью детали.....	133
4.5. Влияние элементов режима железнения на точность формообразуемых заготовок, при восстановлении изношенных деталей	135
4.6. Исследование равномерности распределения покрытий электролитического железа в зависимости от плотности тока и степени разреженности пространства над уровнем электролита.....	139
4.6.1. Условия формирования равномерных электролитических покрытий железа	140
4.6.2. Влияние газовых пузырьков водорода на дефекты и равномерность электролитического слоя железа, осаждаемого на поверхность железоуглеродистых сплавов.....	143
4.6.3. Влияние газовых пузырьков на распределение тока на катоде.....	146

4.6.4. Влияние разрежения над зеркалом электролита на точность размеров, формы и качество поверхностного слоя заготовок	148
4.7. Выводы	157
5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ ПО ИХ ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ	159
5.1. Обоснование нормативов ресурса и предельного технического состояния элементов двигателя.....	159
5.2. Совершенствование системы смазки турбокомпрессоров двигателей КамАЗ-Евро	167
5.3. Технологии восстановления деталей электролитическим железным покрытием	178
5.3.1. Совершенствование технологии восстановления шатунов двигателей КамАЗ	178
5.3.2. Совершенствование технологии восстановления деталей электролитическим железным покрытием	187
5.3.3. Совершенствование технологии восстановления опор блока цилиндров.....	187
5.4. Технология восстановления деталей наплавочными металлопокрытиями	194
5.5. Технология создания плакирующего медного покрытия на поверхностях трения.....	201
5.6. Выводы	204
6. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	206
6.1. Эффективность совершенствования восстановительных технологий	206
6.2. Эффективность совершенствования эксплуатационно-ремонтных циклов двигателей	208
6.3. Результаты внедрения рекомендаций и технологических процессов в производство	211
6.4. Технико-экономическая оценка эффективности исследования	212
6.5. Выводы	215
Основные результаты и выводы.....	217
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	219

Научное издание

Денисов Александр Сергеевич
Асоян Артур Рафикович
Родионов Юрий Владимирович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ
ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Монография

В авторской редакции
Верстка Н.В. Кучина

Подписано в печать 28.05.15. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 14,4. Уч.-изд.л. 15,5. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.
Заказ № 195.

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.