

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»
КАФЕДРА «Эксплуатация автомобильного транспорта»

Утверждаю:
Зав. кафедрой _____ Ю.В. Родионов
(подпись, инициалы, фамилия)

_____ число _____ месяц _____ год

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему:

Исследование физико-химических процессов формирования
металлопокрытий
при восстановлении деталей двигателей

Автор ВКР _____ К. С. Скулкина _____
подпись *инициалы, фамилия*

Направление подготовки 23.04.03 – Эксплуатация транспортно-
технологических машин и комплексов
(наименование)

Группа ЭТМК-21М

Руководитель ВКР _____ Ю.А. Захаров _____
подпись *дата* *инициалы, фамилия*

Пенза, 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»
Автомобильно-дорожный институт
Кафедра «Эксплуатация автомобильного транспорта»

Согласовано:
Декан АДИ

Ю.В. Родионов

(подпись, инициалы,

фамилия)

Утверждаю:
Зав. кафедрой

Ю.В. Родионов

(подпись, инициалы,

фамилия)

число

месяц

год

число

месяц

год

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Студенту гр. ЭТМК-21М _____ Скулкина Константина Сергеевича _____

Тема ВКР_ Исследование физико-химических процессов формирования
металлопокрытий при восстановлении деталей двигателей _____

утверждена приказом по ПГУАС № 06-09-332 от 01 12 2016 г.
число месяц год

ВКР представляется к защите 24 июня 2017 года
число месяц год

Научный руководитель ВКР _____

подпись

дата

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

(Ф.И.О. студента)

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	1
1. Анализ изменения технического состояния силовых агрегатов в процессе эксплуатации	12
1.1. Изнашивание деталей.....	15
1.2. Изменение геометрической формы элементов силовых агрегатов автомобилей в процессе эксплуатации	32
2. Методические вопросы экспериментального исследования	35
2.1. Программа и общая методика исследования	35
2.2. Методика электрохимических исследований.....	37
2.3. Методика исследования структурных преобразований в электролитическом железе	41
2.4. Методика исследования адгезионной связи покрытий электролитического железа с основой	42
2.5. Методика исследования равномерности распределения толщины электролитического железного покрытия	43
3. Исследование физико-химических процессов формирования металлопокрытий при восстановлении деталей двигателей.....	46
3.1. Формирование металлопокрытий электролитического железа в условиях контролируемой разреженной атмосферы	46
3.2. Исследование электрохимического состояния осаждаемой поверхности детали при начальной катодной поляризации в условиях разреженной атмосферы.....	61
3.3. Исследование структурных преобразований в электролитическом железе	64
3.4. Исследование адгезионной связи покрытий железа с восстанавливаемой поверхностью детали.....	69
3.5. Влияние элементов режима железнения на точность формообразуемых заготовок, при восстановлении изношенных деталей.....	71
3.6. Исследование равномерности распределения покрытий электролитического железа в зависимости от плотности тока и степени разреженности пространства над уровнем электролита ..	77
3.7. Выводы	100
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	103

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа

на тему «Исследование физико-химических процессов формирования металлопокрытий при восстановлении деталей двигателей»

Пояснительная записка на 114 с.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
2017 г.

В данной магистерской работе произведено исследование физико-химических процессов формирования металлопокрытий. Выявлены методики электрохимических исследований, адгезионной связи покрытий электролитического железа с основой, равномерности распределения толщины электролитического железного покрытия.

Выполнено исследование структурных преобразований в электролитическом железе, адгезионной связи покрытий железа с восстанавливаемой поверхностью детали, равномерности распределения покрытий электролитического железа в зависимости от плотности тока и степени разреженности пространства над уровнем электролита.

Выявлены влияния газовых пузырьков водорода на дефекты и равномерность электролитического слоя железа, осаждаемого на поверхность железоуглеродистых сплавов, газовых пузырьков на распределение тока на катоде, разрежения над зеркалом электролита на точность размеров, формы и качество поверхностного слоя заготовок.

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 [1]: «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 [2]. 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.

Система обеспечения работоспособности силовых агрегатов автомобилей основывается на закономерностях изменения их технического состояния в процессе эксплуатации. Эти закономерности зависят от групп факторов [3] (рис.1).

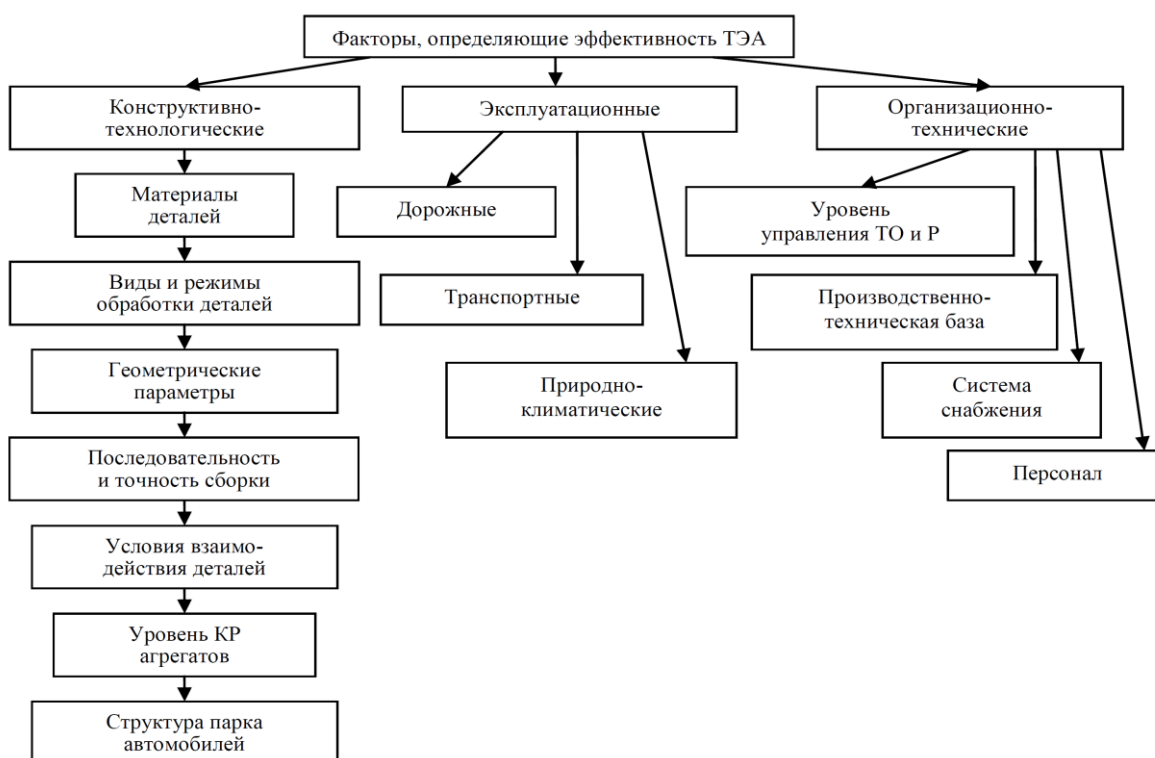


Рис. 1 Схема факторов, определяющих эффективность технической эксплуатации автомобилей

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 [4,5,6].

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 [7].

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.1) [8], 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 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 [9].

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. 2).

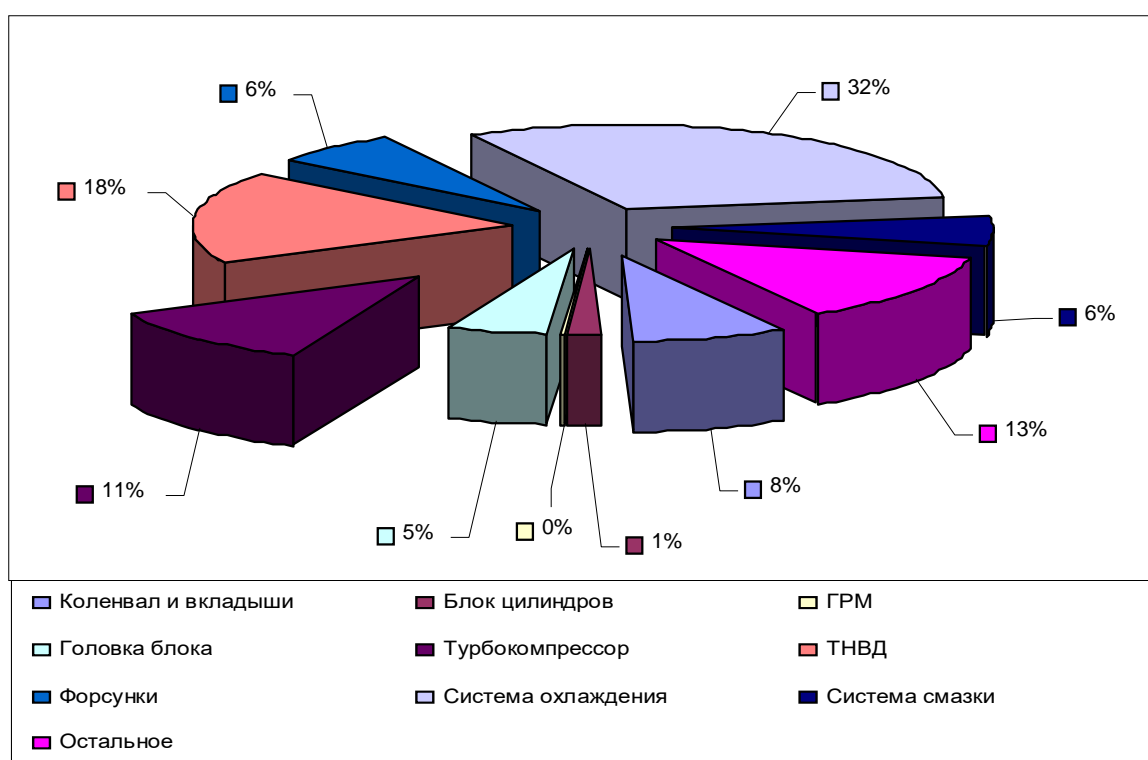


Рис. 2 Распределение отказов по элементам двигателя КамАЗ, собранных за период 2005-2006 гг. в условиях ООО «Саратовский автоцентр КАМАЗ»

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.

Цель работы заключается в исследовании физико-химических процессов формирования металлопокрытий при восстановлении деталей двигателей.

Задачи:

1. Получение контактного слоя железа без трещин.
2. Получение максимальной прочности сцепления электролитического железа с поверхностью детали.
3. Получение равномерных и гладких осадков железа.
4. Влияние разрежения над зеркалом электролита на качество поверхностного слоя заготовок.
5. Предложить практические рекомендации производству.

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 [10].

Как уже определили, основными причинами изменения технического состояния силовых агрегатов являются изнашивание, усталостные, тепловые и коррозионные разрушения [11], 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. 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 [12]:

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 [13].

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 [14].

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.

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 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. Славущкого, 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).

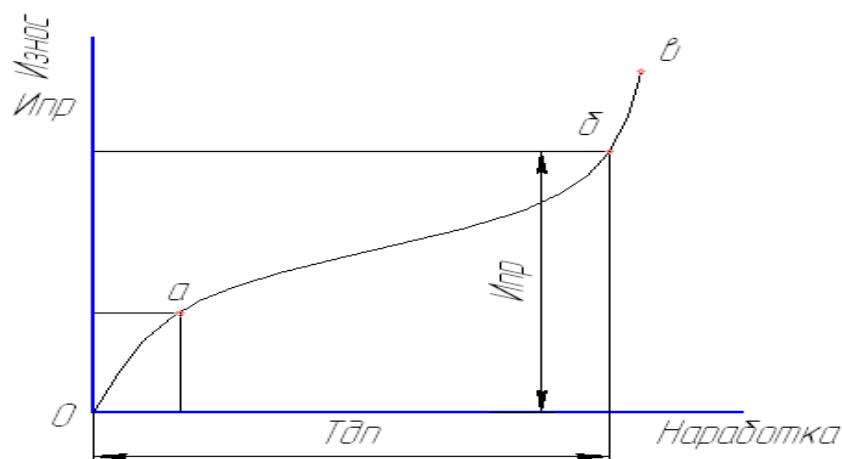


Рис. 1.1 Кривая износа детали:

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 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 [15], 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.

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

Для саморазгружающихся сопряжений также получены экспоненциальные зависимости соответственно (рис.1.2).

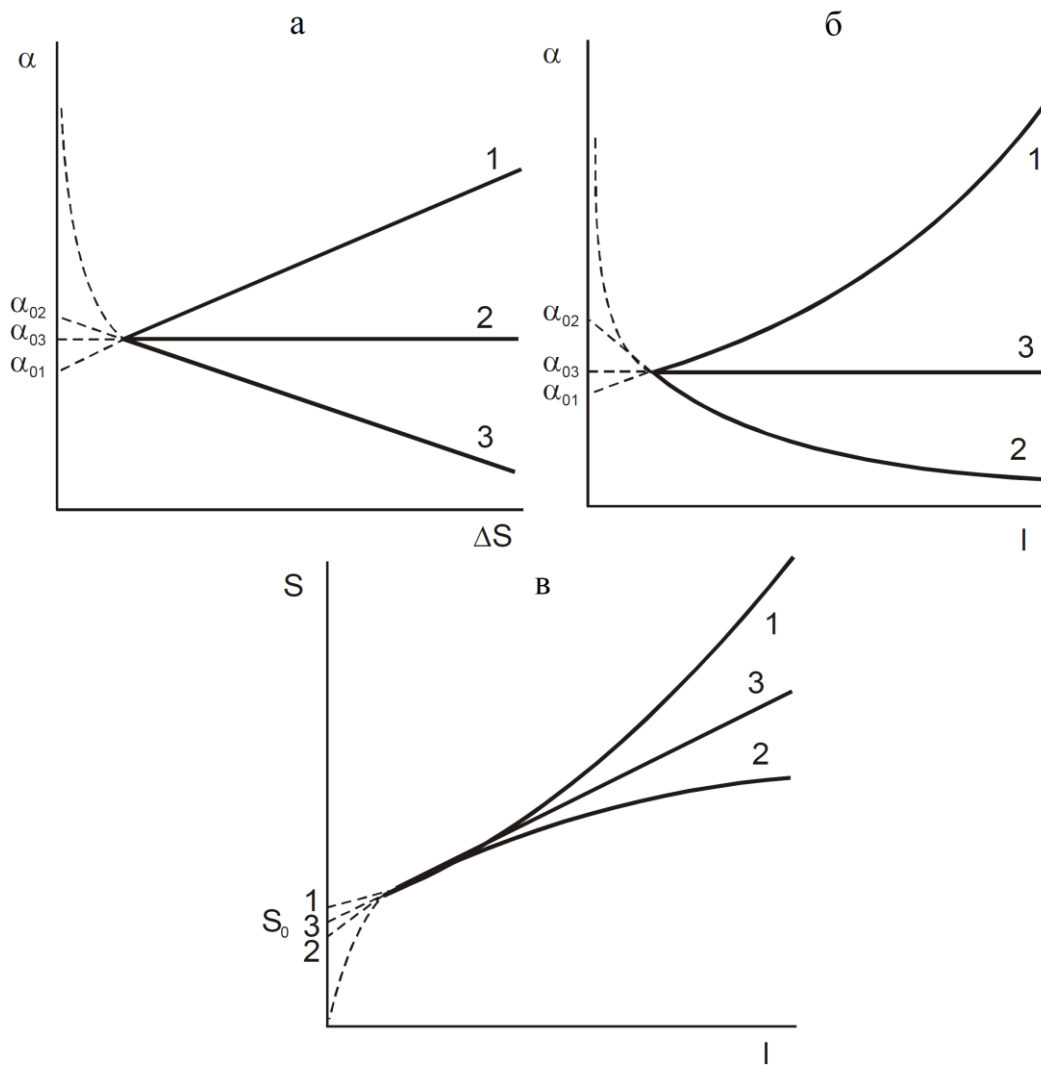


Рис.1.2 Зависимость интенсивности изнашивания α и общего износа S от износа ΔS после приработки (а) и наработки I (б, в) для различных типов сопряжений: 1 – динамически нагруженные; 2 – саморазгружающиеся; 3 – с неизменным

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).

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:

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

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

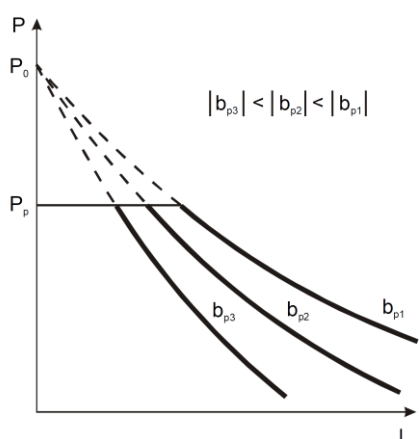


Рис.1.3. К понятию смысла параметров p_0 и b_p :
 P_p – давление, ограниченное редуционным клапаном

небольших оборотах вращения коленчатого вала, режиме холостого хода, давление масла в системе смазки снижается, при номинальной частоте вращения коленчатого вала давление поднимается, но ограничивается работой редуционного 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.

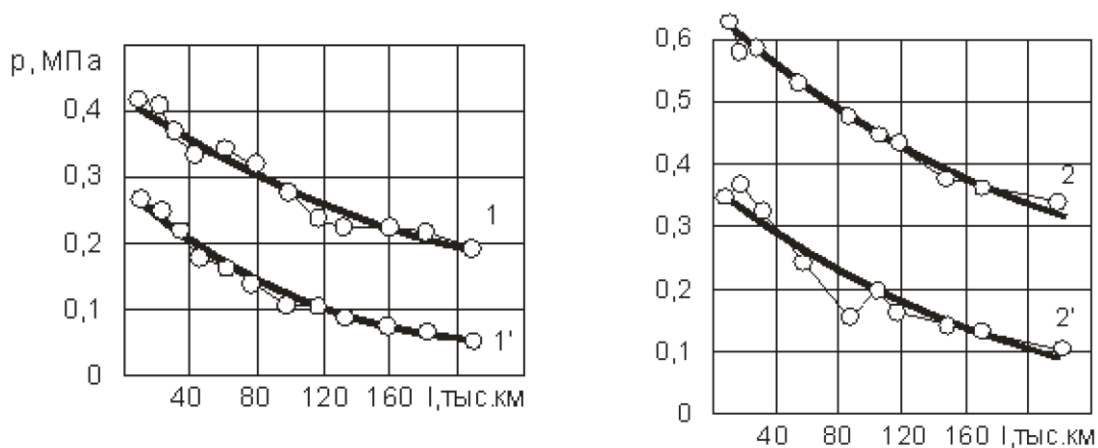


Рис.1.4 Зависимость давления в системе смазки от наработки двигателей:
1– КамАЗ-740; 2 – ЯМЗ-236 (без штриха – нормальный режим, со штрихом – режим холостого хода)

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

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

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:

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

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

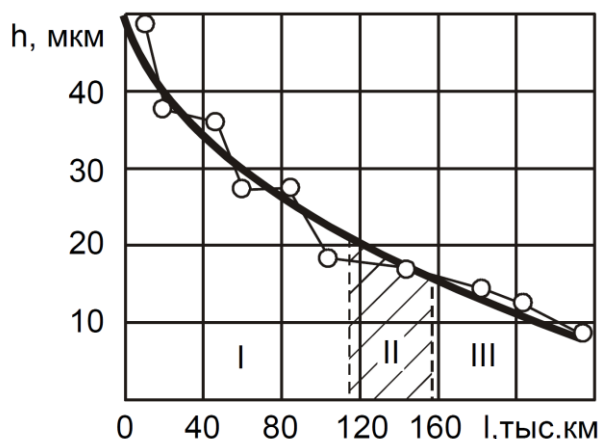


Рис.1.5 Зависимость ТМС от наработки двигателей КамАЗ – 740:

- I – область жидкостного трения; II – перехода в полужидкостное трение;
- III – полужидкостного трения

При исследовании изменения технического состояния саморазгружающихся сопряжений в работах предложено использовать зависимость:

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

Аппроксимируя уравнение (1.12) полиномом второй степени, получим:

$$y = y_0 + al - bl^2, \quad (1.13)$$

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

Экспериментальные исследования, частично представленные на рис.1.6, показывают справедливость описанных зависимостей.

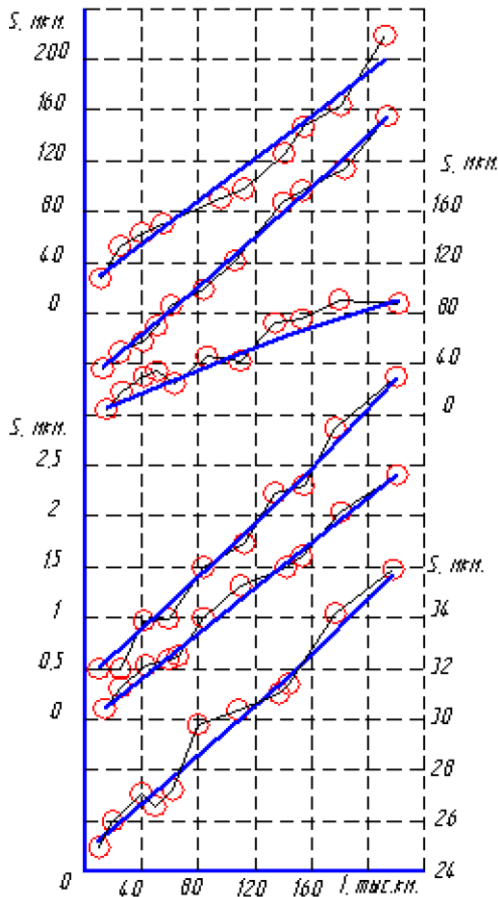


Рис. 1.6 Зависимость показателей технического состояния цилиндропоршневой группы двигателей от наработки:
1 – износ гильз; 2 – радиальный износ верхних

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 ресурсоопределяющих 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 харак-

теризуется 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» [16]. Результаты обработки приведены в табл. 1.3 и на рис. 1.7. Анализ эксплуатационных отказов силовых агрегатов КамАЗ, проведенный в ООО «Саратовский автоцентр КАМАЗ», представлен в табл. 1.2.

Таблица 1.1

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

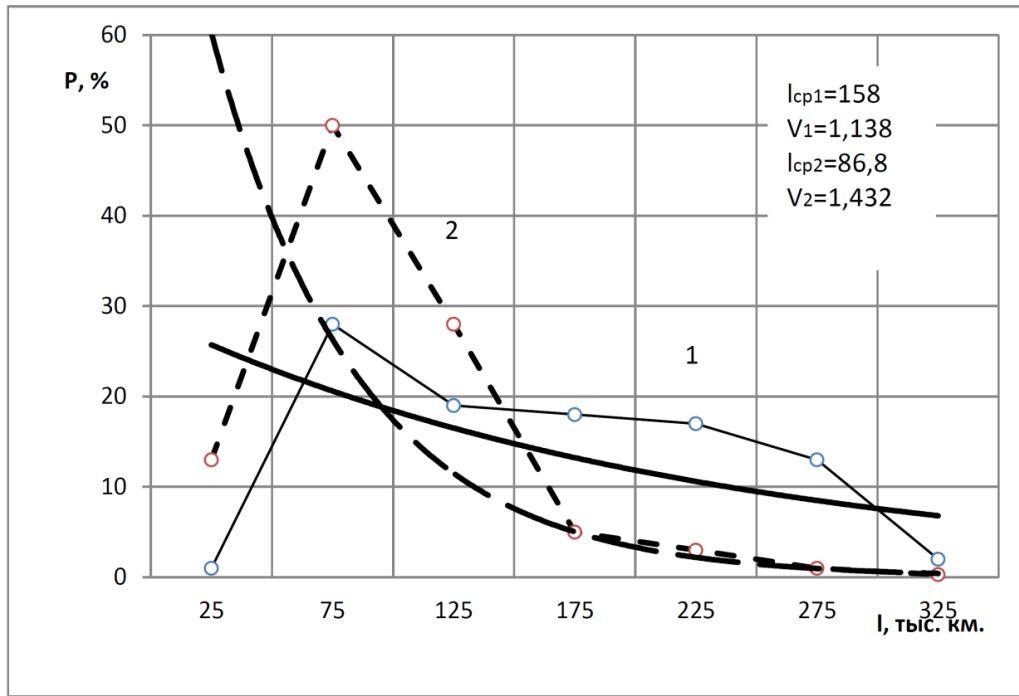
Наименование дефектов	Период	Интервалы пробега, тыс.км								Двигатели с дефектами	
		0-30	30-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	св 350	Всего	НРТА
1. Естественный износ ЦПГ и КШМ	Н		0,92	0,61	14,24	21,05	20,74	36,22	6,19	44,36	
	Р	0,78	17,32	15,74	22,04	13,38	30,70	-	-	31,51	-
2. Пылевой (абразивный) 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

НРТА - нарушение регулировки топливной аппаратуры

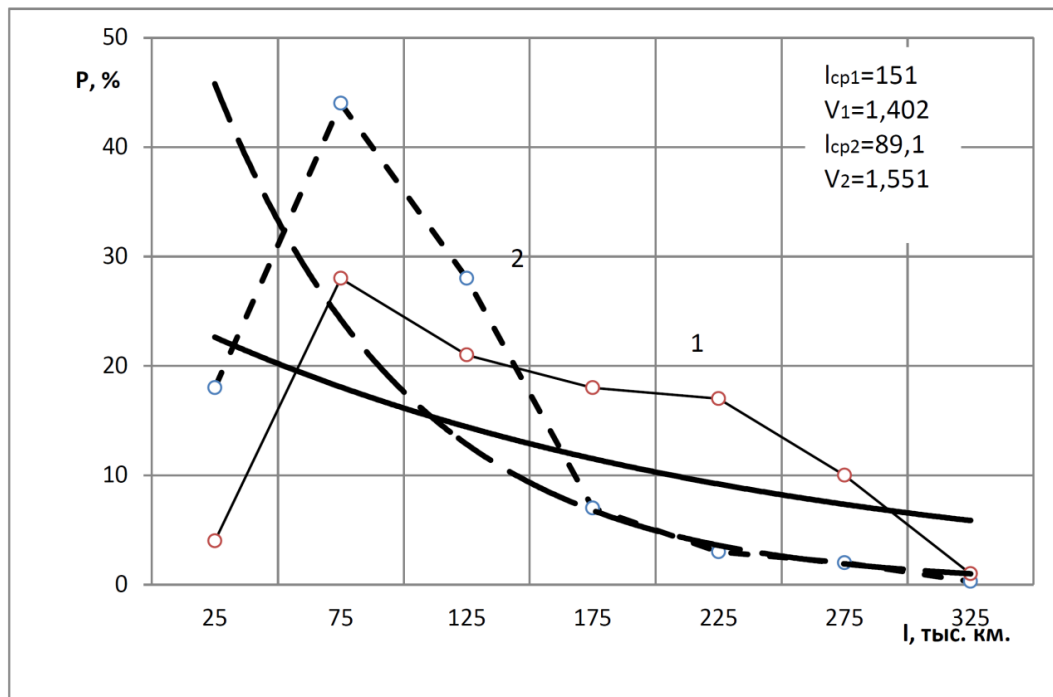
Таблица 1.2

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).

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.

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.

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.

Т а б л и ц а 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

Т а б л и ц а 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 [17].

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 ресурсопределяющим 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 [18,19,20,21,22].

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 [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30], частично приведенные на рис. 1.8, подтверждают полученные зависимости изменения размеров и формы деталей силового агрегата от наработки.

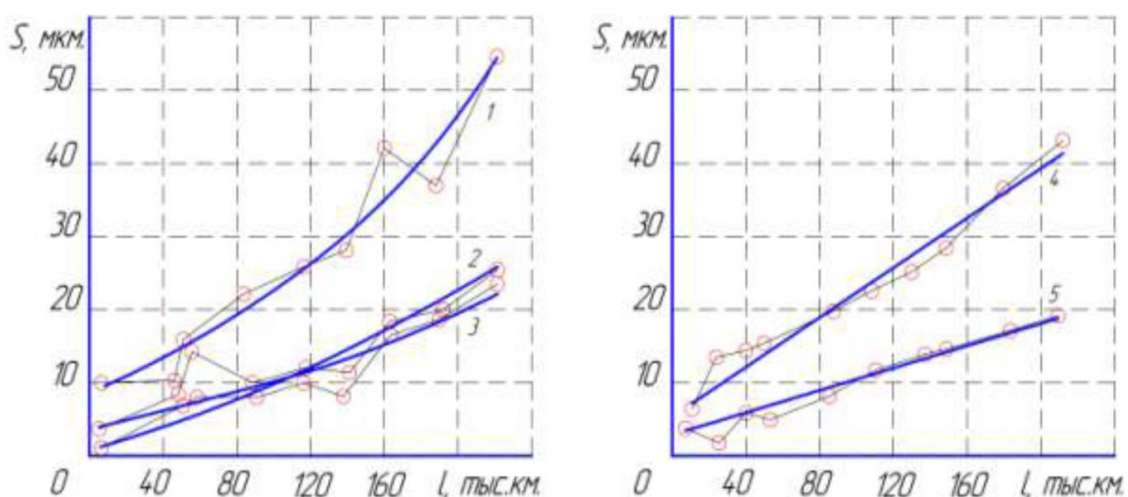


Рис.1.8 Зависимость прогиба коленчатого вала – 1, овальности коренных – 2, шатунных – 3 шеек, гильз цилиндров в изношенном – 4, и неизношенном – 5 поясах от наработки двигателя КамАЗ-740

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:

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

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 :

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

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.

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.

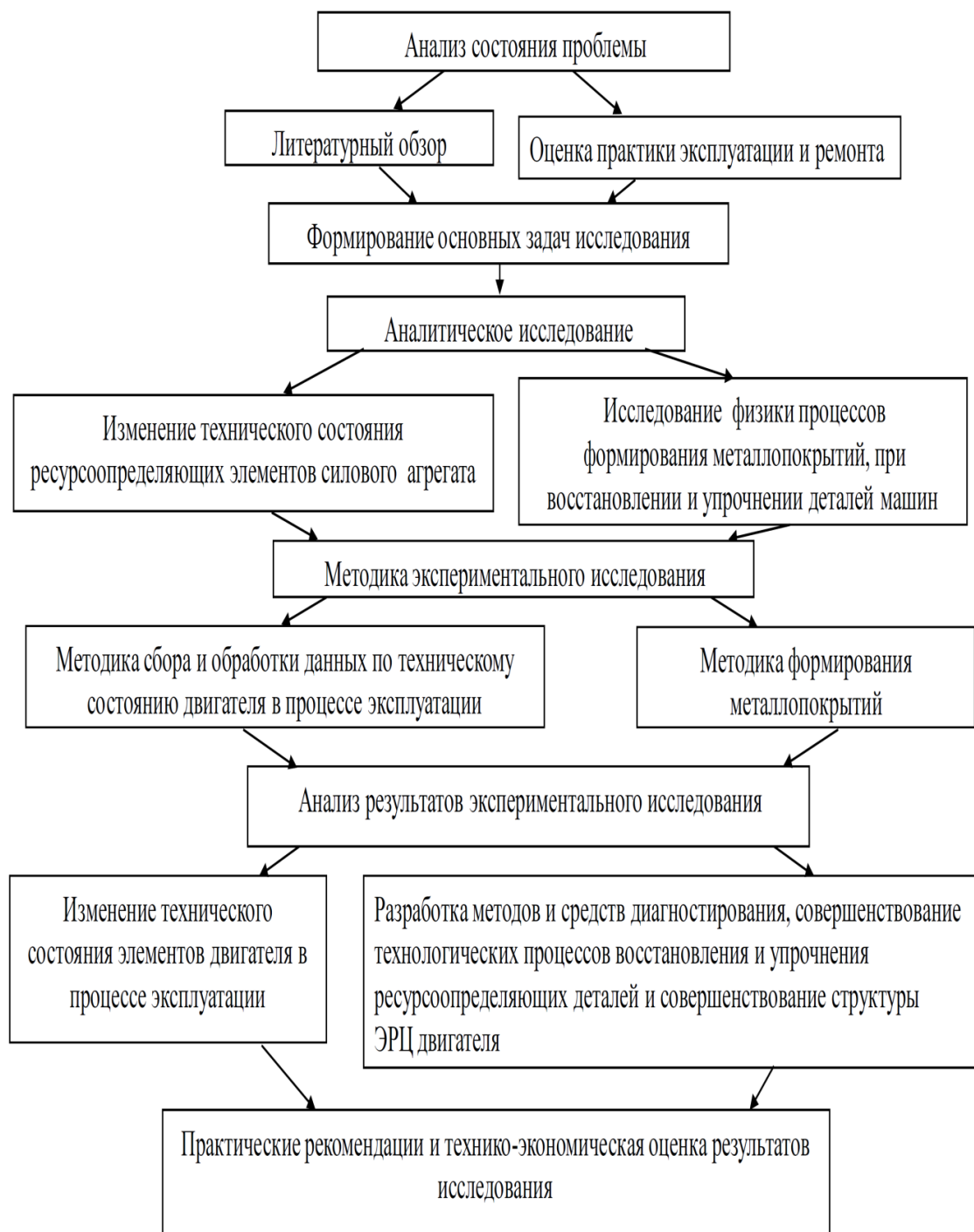


Рис. 2.1. Схема программы и общей методики исследования

2.2 Методика 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 [31].

Схема установки представлена на рис. 2.9 Исследования проводятся в стеклянной герметизированной электрохимической ячейке ЯСЭ–2 (ТУ 2550). В качестве электрода сравнения используется насыщенный хлорсеребряный 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 (°C): 20; 55; 80. 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) $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, температура в ячейке измерялась ртутным термометром (ГОСТ 215–73 ТЛ–2) с точностью $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. 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 °C – $2,5 \times 10^3$ Па, при 55 °C – $1,5 \times 10^4$ Па, при 80 °C – $4,7 \times 10^4$ Па. При выбранных значениях величины степени разрежения давление над электролитом не достигает значения давления насыщенного пара, т.е. наблюдается кипение электролита.

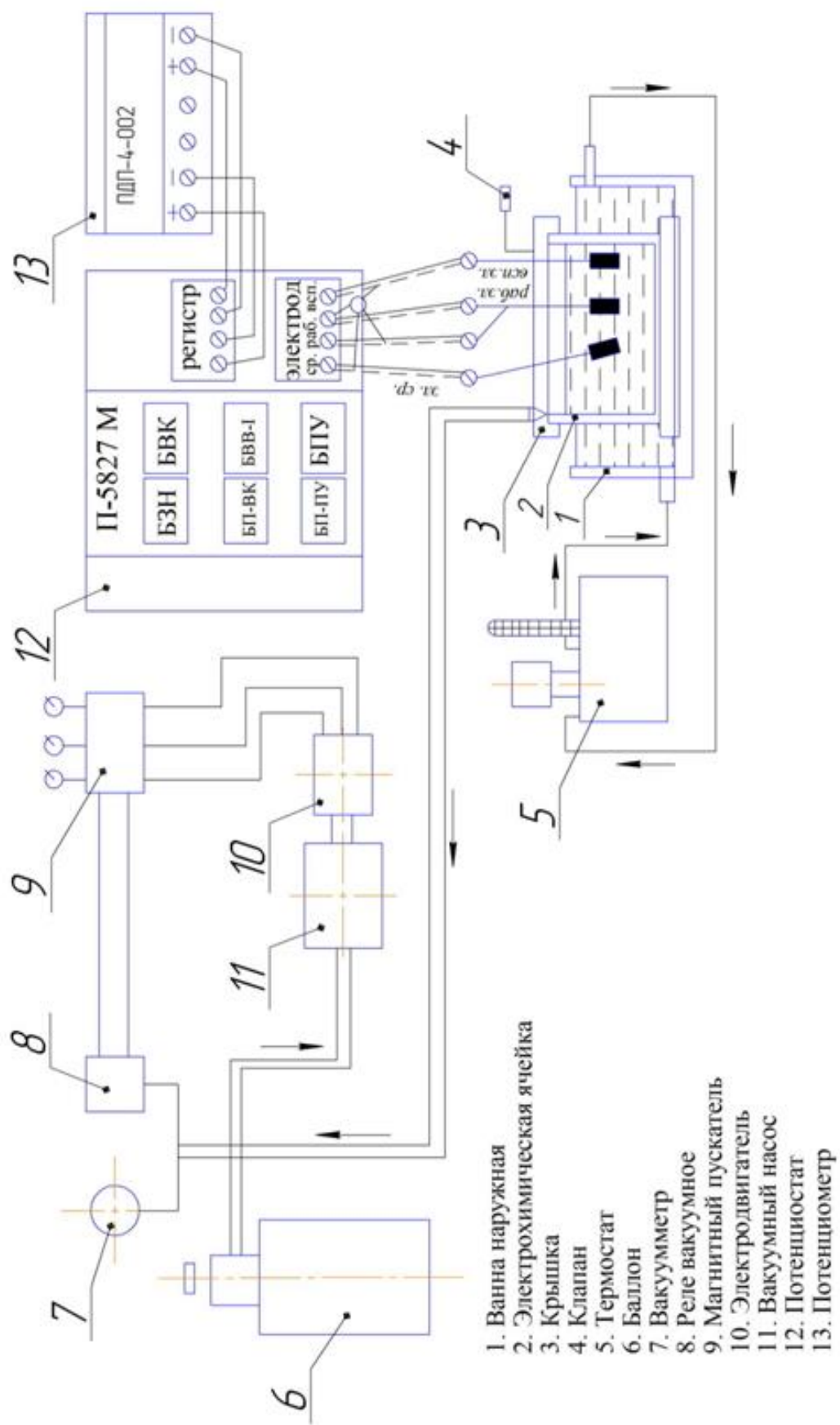


Рис. 2.9 Схема установки исследования электрохимического состояния поверхности образца

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.

2.3 Методика исследования структурных преобразований в электролитическом железе

Нанесение электролитических покрытий на образцы производилось на специальной установке (рис. 2.10) [31].

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/дм²;
- температура электролита – 53 °С;
- степень разрежения в ячейках – 75...80%.

Начальный период электролиза проводился при плотности тока D_k – 0,36 А/дм² 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. Взвешивание образцов производилось на аналитических весах АДВ–200 с погрешностью $\pm 0,0001 \text{ г}$. 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.

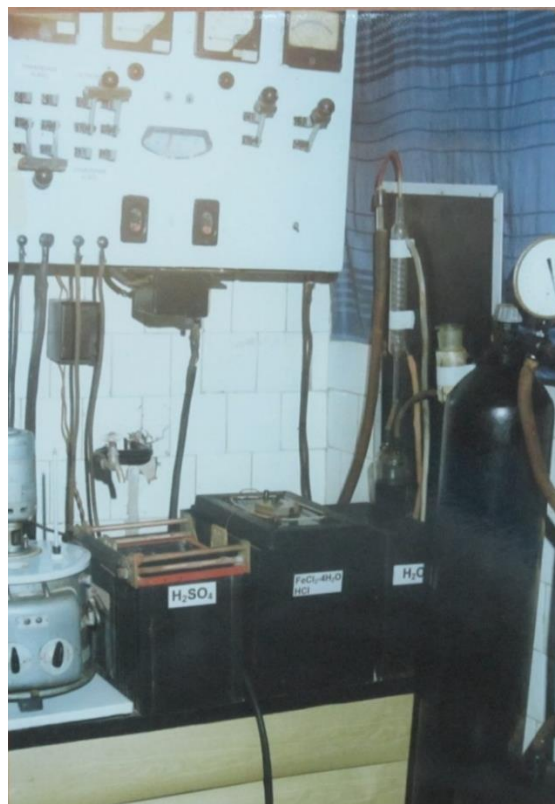


Рис. 2.10 Установка для нанесения электролитических покрытий железа

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 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 дм². Шероховатость поверхности соответствовала 7-му классу (0,63) [31].

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.

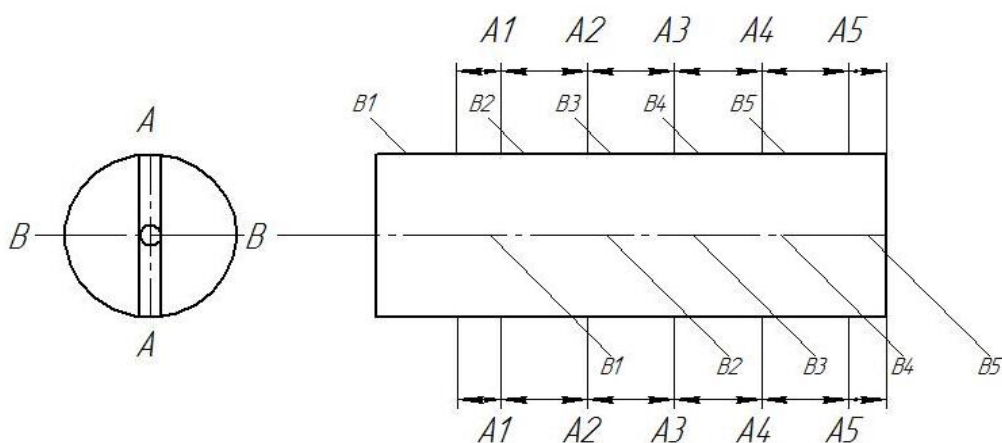


Рис. 2.11 Схема замеров

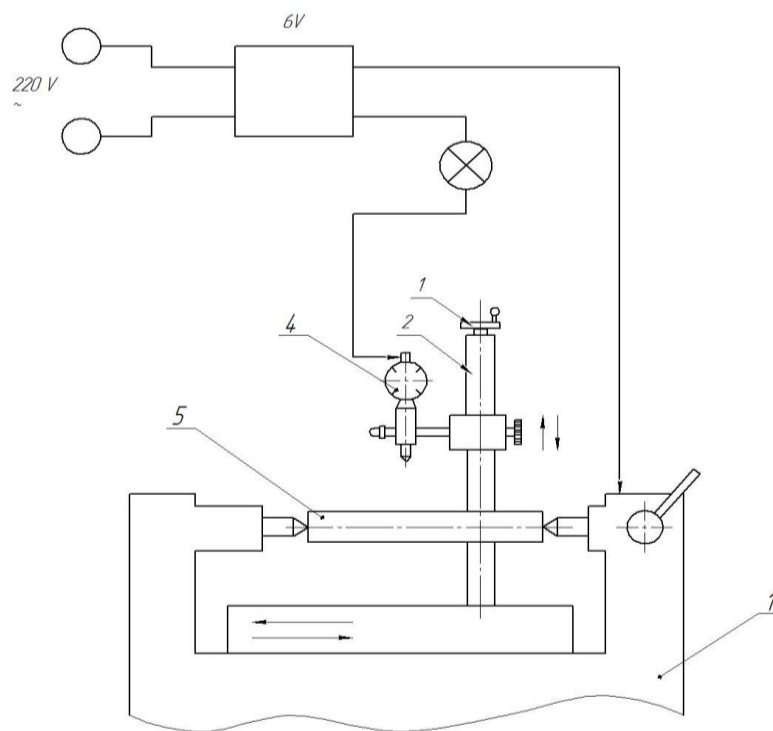


Рис. 2.12 Приспособление для измерения толщины

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 $\tau = 6-7$ с.

7. Промывка образца в теплой воде $t = 40-60$ °С.

8. Железнение образца.

Состав электролита железнения:

– хлористое железо $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 300 - 350$ г/л;

– соляная кислота $\text{HCl} - 2 - 3$ г/л;

– материал анодов – армко-железо.

Режим железнения образцов:

– плотность тока 20 А/дм²;

– 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 $D_k = 4$ А/дм² 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/дм² :

– температура электролита – 65 °С;

– степень разреженности – $50-55\%$.

9. Промывка образца холодной водой.

10. Демонтаж образца с подвешного приспособления.

11. Снятие замеров.

3 Исследование физико-химических процессов формирования металлопокрытий при восстановлении деталей двигателей

3.1 Формирование металлопокрытий электролитического железа в условиях контролируемой разреженной атмосферы

3.1.1 Формирование структуры электролитического железа

Осаждение металла на катоде рассматривается как процесс, протекающий в две стадии: образование центров кристаллизации (зародышей) и рост образовавшихся центров кристаллизации [32].

Величина образовавшихся кристаллов определяется соотношением скоростей указанных стадий, а также средним временем образования кристалла, протекающим с момента образования зародыша до прекращения роста кристалла [33, 34].

При электрокристаллизации величина кристаллов получается тем меньше, чем меньше концентрация, ниже температура и больше вязкость электролита – факторы, определяющие диффузию [35]. Исследование явлений слоеобразования на гранях кристаллов при электроосаждении железа привело к ряду важных заключений [36, 37, 38]:

- 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. 3.1);

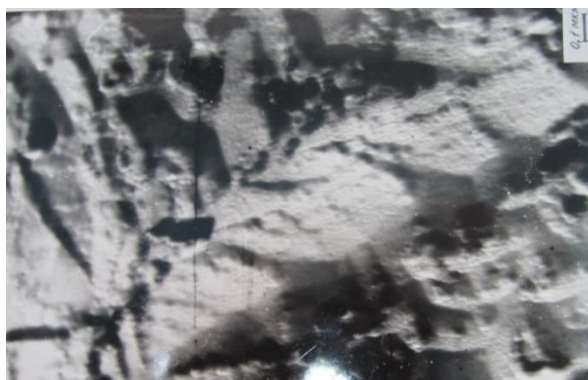


Рис. 3.1 Трехмерные ступени (пакеты) роста твердого электролитического железного покрытия

– скорость распространения слоя по грани также изменяется в соответствии с его толщиной;

– нередко на еще не завершенном 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. 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 [38].

Принудительное движение электролита вдоль растущей грани кристалла вызывает направленное смещение фронта роста слоя электролитического железа в соответствии с направлением его движения [39, 40]. 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.

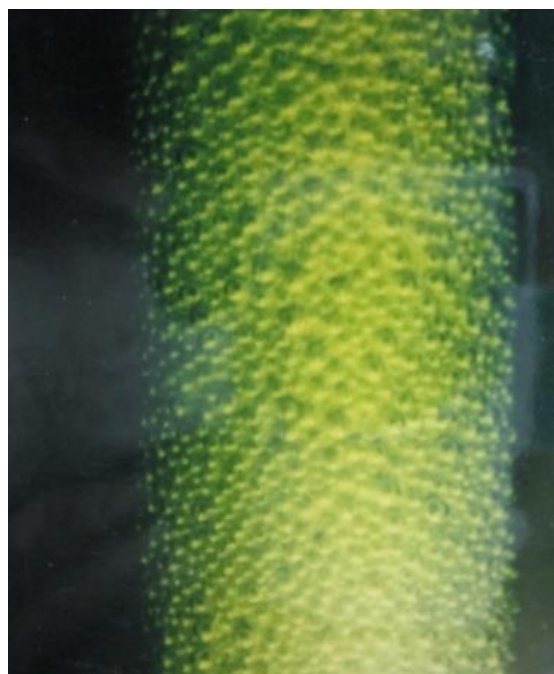


Рис. 3.2 Адсорбция пузырьков

Исследования по электроосаждению железа показали [41, 42], 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. 3.2) и приводит к повышению истинной плотности тока. Особенно это 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.

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.

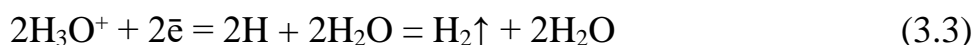
Исследования, выполненные Ю.В. Баймаковым и Ю.Н. Петровым [43], показали, что ухудшение механических свойств электролитических осадков железа, главным образом, связано с включением в них молекулярного водорода, а атомарный водород, находясь в твердом растворе с α -железом, искажает кристаллическую решетку 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.

При адсорбции водорода на металлах группы железа объемное и мольное соотношения адсорбированных атомов водорода к атомам металла составляют 1:24 и 1: 1000 соответственно. 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

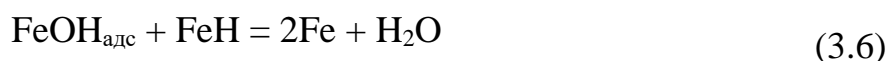
М. П. Мелкова, количество водорода, включающегося в электролитические осадки железа, колеблется от 0,5 до 2 см³/г. Исследования, выполненные Н.М. Савельевым, показали, что для осаждения железа из хлористых электролитов при катодной плотности тока 20А/дм² и выше лучше применять более высокую концентрацию 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 [44, 45, 46], 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°С, рН 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» [47, 48, 49]. 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. 3.3).



Рис. 3.3 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. 3.4) указывает на возникновение в них больших внутренних напряжений, превышающих предел прочности электролитического железа.

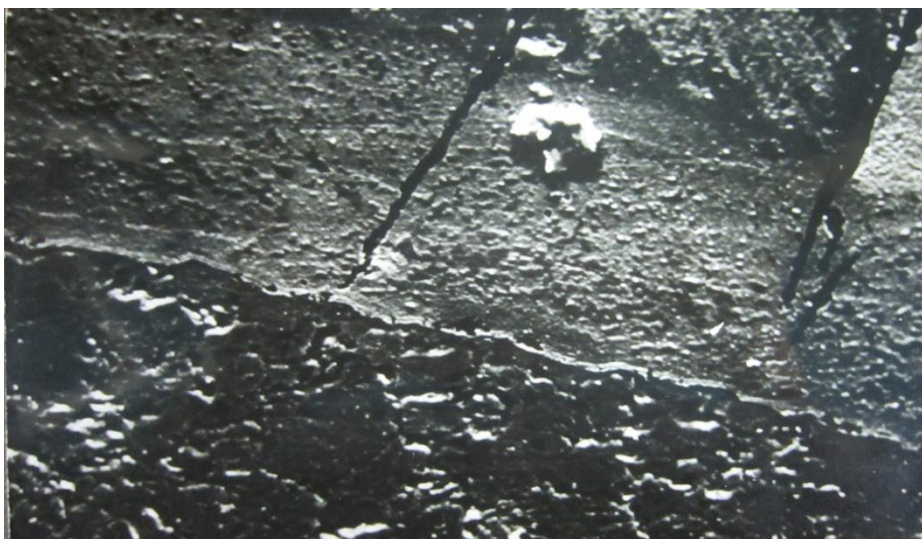


Рис. 3.4 Появление трещин в покрытиях железа

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. 3.5).

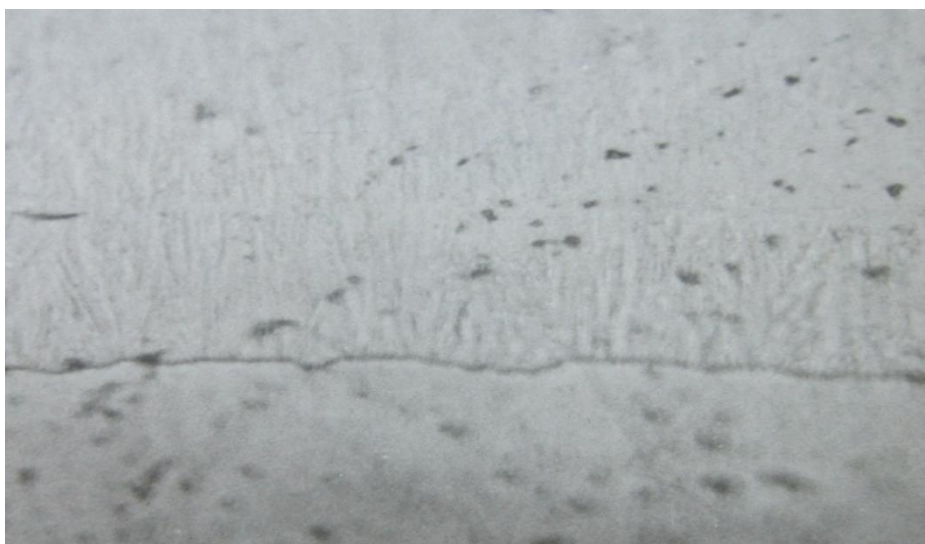


Рис. 3.5 Неметаллические включения, случайно внесенные в покрытия при электролизе

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 [51] 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.

3.1.2 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 ($\text{H}_{\text{адс}}$), 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 $\text{H}^+ = \text{H}_{\text{адс}}$ 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 [52]. В этом случае на катоде происходит восстановление водорода $\text{H}_2 = \text{H}_{\text{адс}}$.

Поверхностная концентрация адсорбированных атомов возрастает и принимает значения $(H_{\text{адс}})_2$. Величина $(H_{\text{адс}})_2$ зависит от поляризации, т.е. от скорости катодного процесса. Увеличение $(H_{\text{адс}})_2$ должно нарушить равновесие и вызвать химическую рекомбинацию $2H_{\text{адс}} = H_2 \uparrow$. Скорость ее может быть описана уравнением бимолекулярной реакции:

$$I_k = K(H_{\text{адс}})_2^2, \quad (3.9)$$

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 $\varphi_k = \varphi_a = \varphi_{\text{равн}}$, приводят к неравенству $\varphi_k > \varphi_{\text{равн}}$. 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:

$$\varphi = 0,059 \lg \frac{[H^+]}{P_{H_2}^{1/2}}, \quad (3.10)$$

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 $-\lg[H^+] = \text{pH}$, уравнение (4.10), то при $P_{H_2} = 1$ атм. это уравнение можно представить в виде:

$$\varphi = -0,059 \text{pH}. \quad (3.11)$$

Из выражения (3.11) 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 рН 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 отклонению потенциала от равновесного и обуславливает значительный рост плотности тока.

Рассматривая поляризационную диаграмму самопроизвольного окисления металла, представленную на рис. 3.6, 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 ($\phi_{равн}^{Me}$).

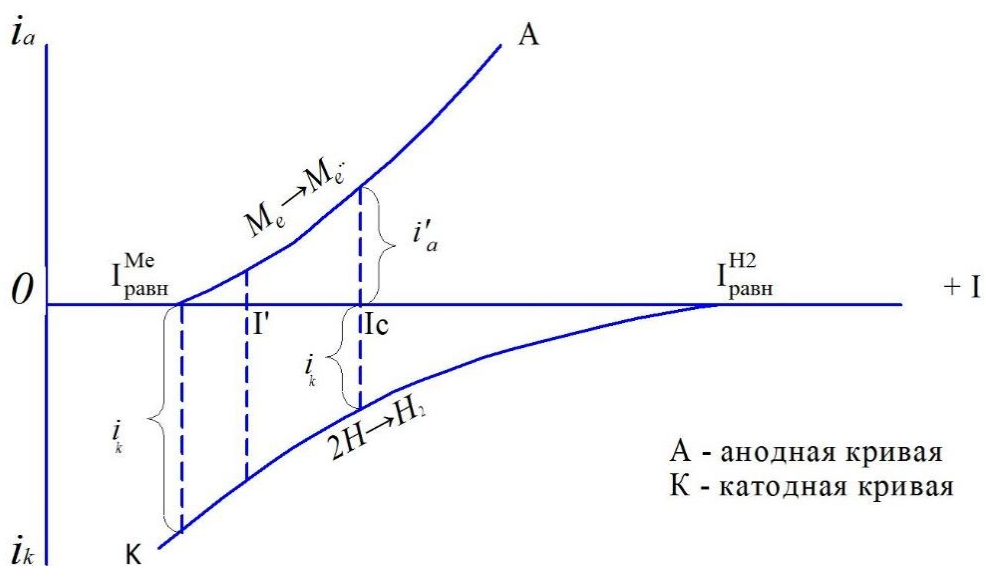


Рис. 3.6 Поляризационная диаграмма окисления металла

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 ($Me(OH)_2$). 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 $\varphi_{\text{равн}}^{\text{Fe}}$. 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 рН=2,2...2,7, а гидрозакуси железа ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) – при рН=6,2...6,5. Заметное падение выхода железа по току начинается при рН=1, если электролиз железа проводится даже при плотностях тока 20...30 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. 3.6).

В кислом электролите железения 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 [53]:

$$Q = K \times I_{\text{ж}}, \quad (3.12)$$

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

$$K'_{\text{вес}} = \frac{q_0 - q_1}{S\tau}, \quad (3.13)$$

где q_0 – начальный вес металла, г; q_1 – вес металла после растворения и удаления продуктов травления, г; S – поверхность металла, см²; τ – время процесса растворения, ч.

Тогда, очевидно, между токовым и весовым показателями процесса растворения сплава существует такая связь:

$$I_{\text{ж}} = \frac{D_{\text{к}} K'_{\text{всс}}}{C_{\text{к}}}, \quad (3.14)$$

где $D_{\text{к}}$ – катодная плотность тока, А/дм; $C_{\text{к}}$ – электрохимический эквивалент железа, г/А.ч.

На основании уравнения (3.14) 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 [58]. 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.

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 (3.14). Проведенные исследования [54, 55] 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°С, должна составлять 75...85%.

Согласно уравнению (3.10), 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.

3.2 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 [56, 57]. 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. 3.7, 3.8, 3.9), 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. 3.7, кривые 2, 3).

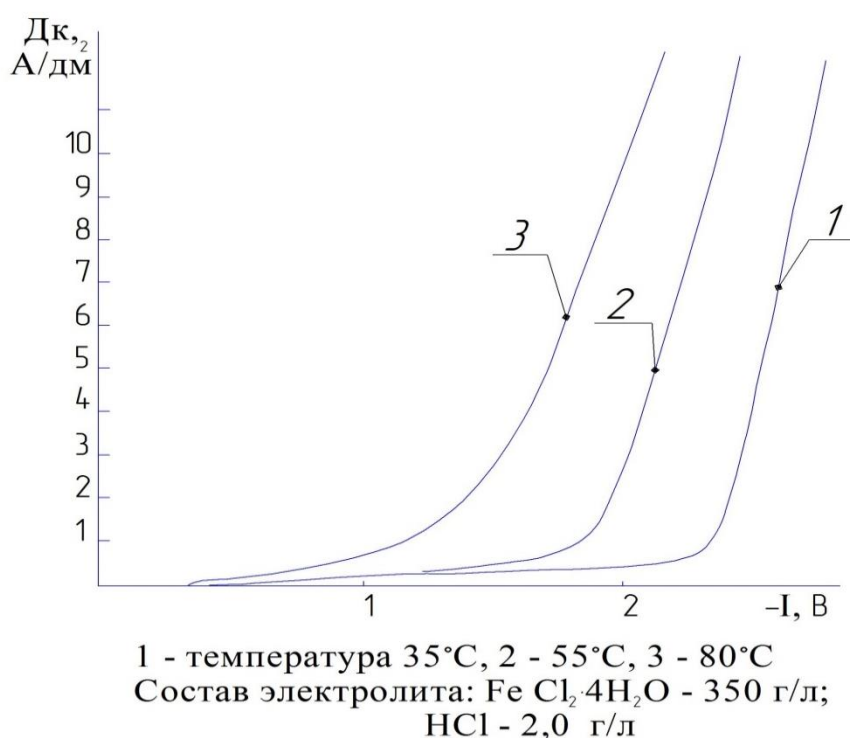


Рис. 3.7 Поляризационные кривые восстановления водорода из хлористого электролита железнения

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, увеличение выхода по току водорода, особенно при малых плотностях тока в начальный период осаждения. Это подтверждается проведенными исследованиями: 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.

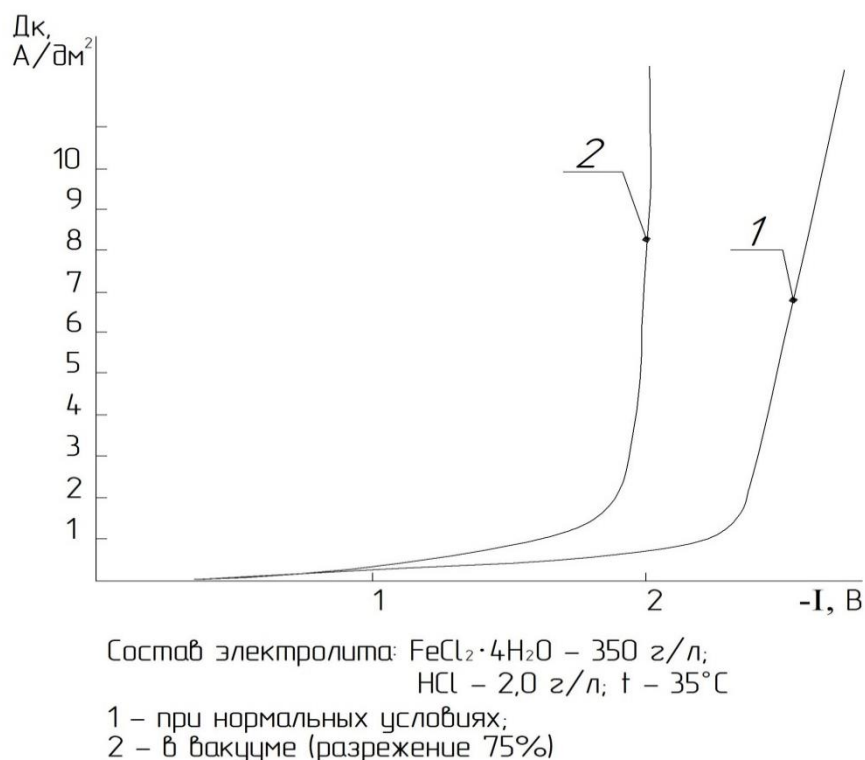
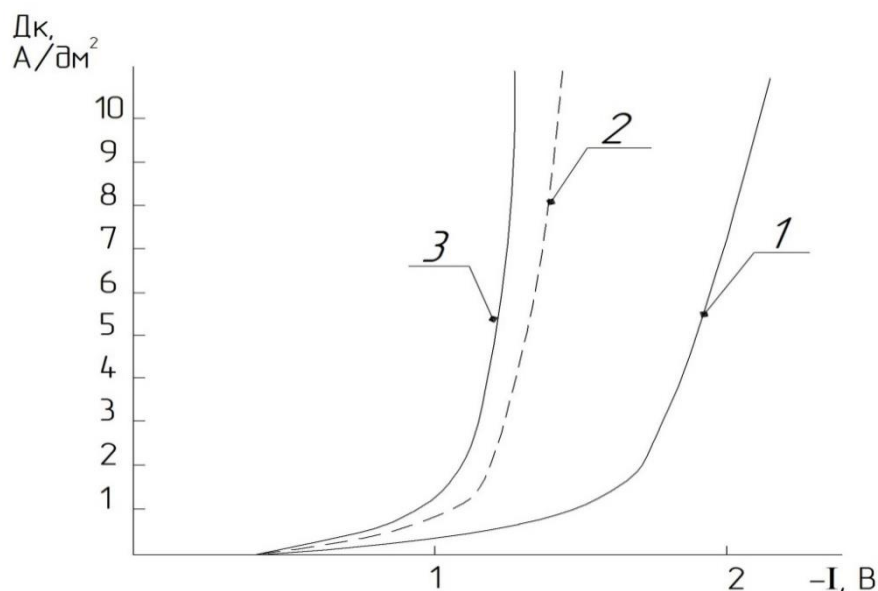


Рис. 3.8 Влияние разреженной среды на поляризационные кривые восстановления водорода из хлористого электролита железения



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. 3.9 Влияние разреженной среды на поляризационные кривые восстановления водорода из хлористого электролита железнения

3.3 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. 3.10) 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 [58], способствует увеличению времени установления стационарного режима протекания электроосаждения и интенсивному нагреву поверхности.



Рис. 3.10 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 гидроксидных соединений.

При повышении катодной плотности тока выход железа по току возрастает (рис. 3.11).

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...10 А/дм² 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. 3.12 следует, что микротвердость железа увеличивается с повышением катодной плотности тока. Более интенсивное повышение твердости железа наблюдается при плотности тока более 8 А/дм².

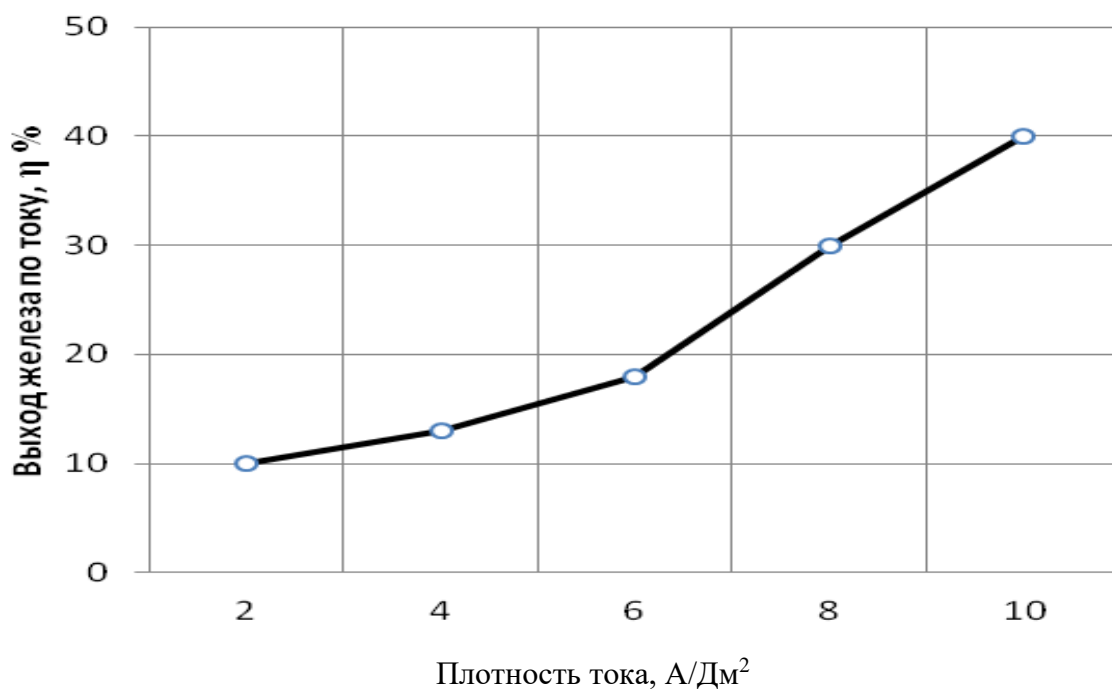


Рис. 3. 11 Изменение выхода железа по току в зависимости от катодной плотности тока

На фотографиях микроструктуры электролитического железа наблюдается столбчатая дендритообразная структура (рис. 3.13), при плотностях тока 8...10 А/дм² железо имеет характерную волокнистую структуру с волокнами, расположенными перпендикулярно поверхности покрытия.

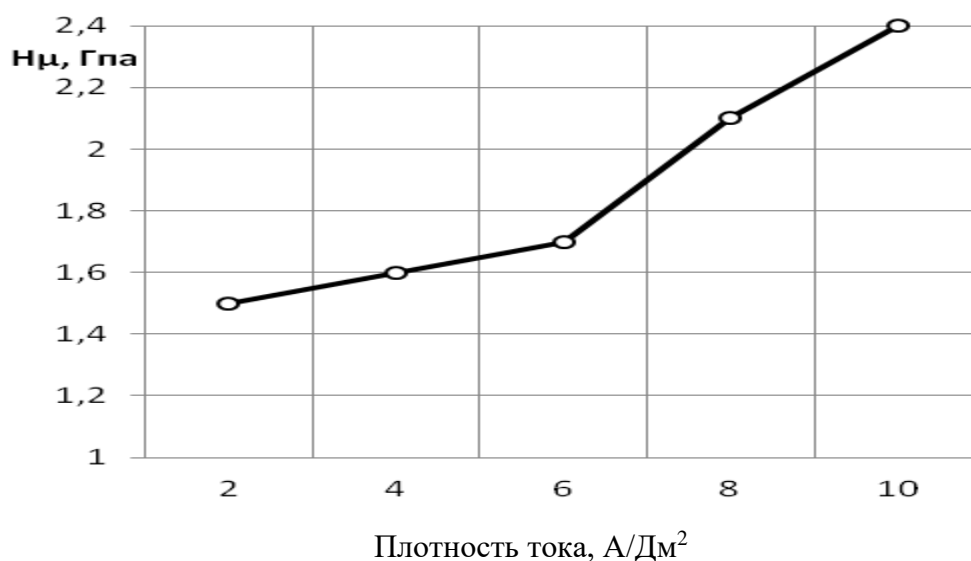


Рис. 3.12 Изменение микротвердости железа в зависимости от катодной плотности тока



Рис. 3.13 Микроструктуры электролитического железа, полученного при плотностях тока $8 \dots 10 \text{ А / дм}^2$

При плотности более 10 А/дм^2 в железе наблюдаются трещины (рис. 3.14).



Рис. 3.14 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 $55 \text{ }^\circ\text{C}$, следует проводить при значениях катодной плотности тока в интервале $6 \dots 8 \text{ А/дм}^2$.

3.4 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. 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. 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. 3.1, 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. 3.11). 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 3.1

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.

Покрытия железа сдвигаются с поверхности образца в виде сплошного кольца. Покрытия железа, полученные при значении плотности тока 10А/дм², сдвигаются при более низких значениях напряжения сдвига.

Такие покрытия формируются, когда наступает предельный ток по водороду и создаются благоприятные условия для защелачивания прикатодного слоя электролита и образования гидроокислов 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 [59, 60, 61, 62].

3.5 Влияние элементов режима железнения на точность формообразуемых заготовок, при восстановлении изношенных деталей

В ранее проведенных исследованиях [63, 64] 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 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 $F_{\text{рас}} < F_{\text{табл}}$.

Уравнения, показывающие зависимость исследуемых функций от частых параметров электролиза, имеют следующий вид:

для пояса 1

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & 41,094 - 0,103T - 1,229D_k - 34,712\tau - 0,005TD_k + 0,148D_k\tau + \\ & + 0,002T^2 + 0,273D_k^2 + 12,4963\tau^2; \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$F_{\text{рас}} = 0,857 < F_{\text{табл}} = 3,630,$$

для пояса 2

$$\begin{aligned} \sigma_2 = & 23,417 + 0,144T - 0,646 D_k - 23,966\tau - 0,002 TD_k - 0,048 D_k\tau - \\ & - 0,001T^2 + 0,014 D_k^2 + 8,279\tau^2; \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$F_{\text{рас}} = 1,785 < F_{\text{табл}} = 4,490,$$

для пояса 3

$$\begin{aligned} \sigma_3 = & 190,66 - 3,757T - 1,915 D_k - 48,323\tau + 0,004 TD_k + 0,086 D_k\tau + \\ & + 0,025T^2 + 0,028 D_k^2 + 18,358\tau^2; \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$F_{\text{рас}} = 1,739 < F_{\text{табл}} = 2,740 ,$$

отклонение профиля продольного сечения

$$\begin{aligned} \rho_1 = & 88,829 + 2,021T + 1,798 D_k + 65,908\tau + 0,004 TD_k + 0,153 D_k\tau + \\ & + 0,016T^2 - 0,052 D_k^2 - 23,731\tau^2; \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$F_{\text{рас}} = 2,171 < F_{\text{табл}} = 3,630.$$

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. 3.15, 3.17, 3.19 соответственно. На рис. 3.16, 3.18, 3.20 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_l) 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 работ.

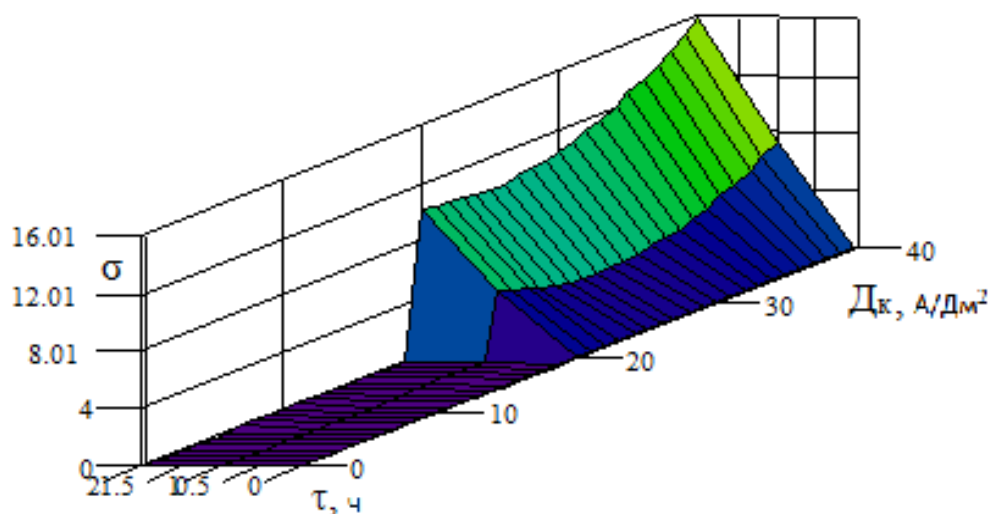


Рис. 3.15 Поверхность отклика в исследуемом факторном пространстве в зависимости среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности

электролиза (τ) и плотности тока (D_k), при фиксированном значении температуры электролита $T=70\text{ }^\circ\text{C}$

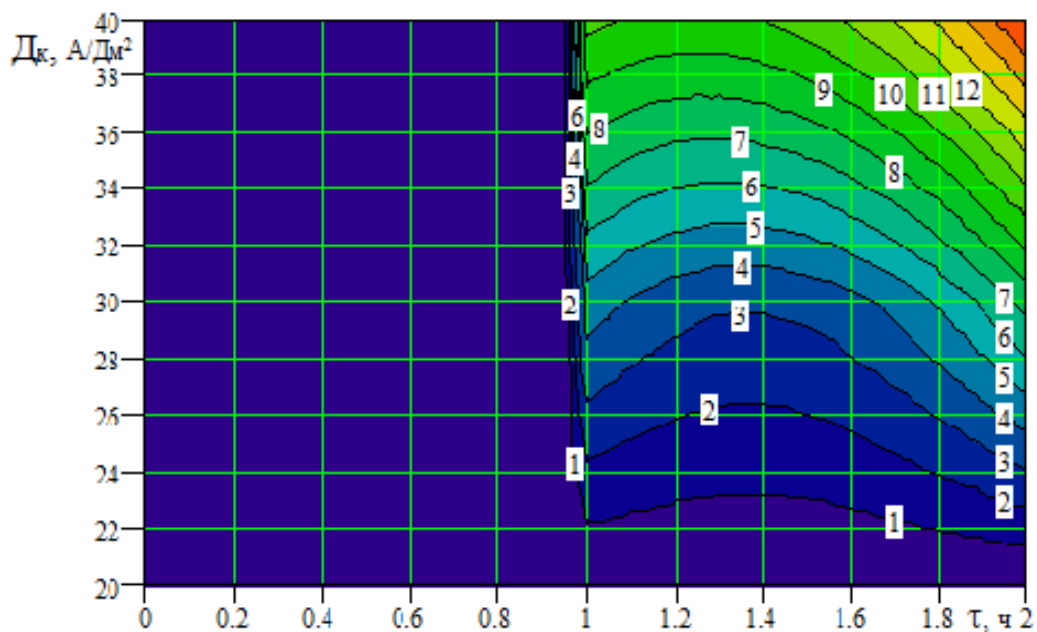


Рис. 3.16 Линии равного уровня значений среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза(τ) и плотности тока (D_k) при фиксированном значении температуры электролита $T=70\text{ }^\circ\text{C}$

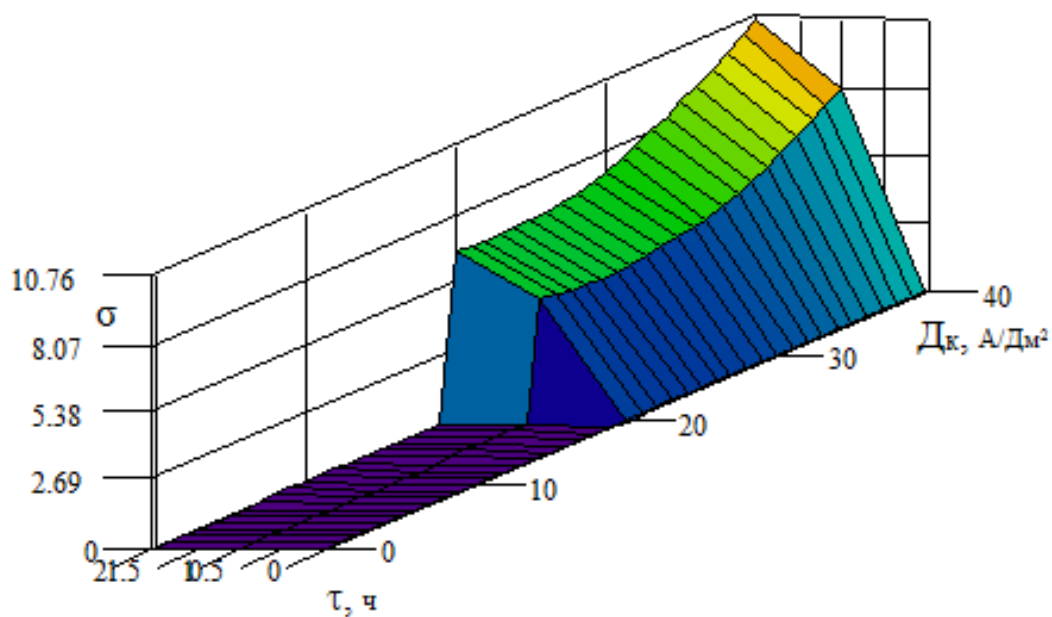


Рис. 3.17 Поверхность отклика в исследуемом факторном пространстве в зависимости среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности

электролиза (τ) и плотности тока (D_k), при фиксированном значении температуры электролита $T=70\text{ }^\circ\text{C}$

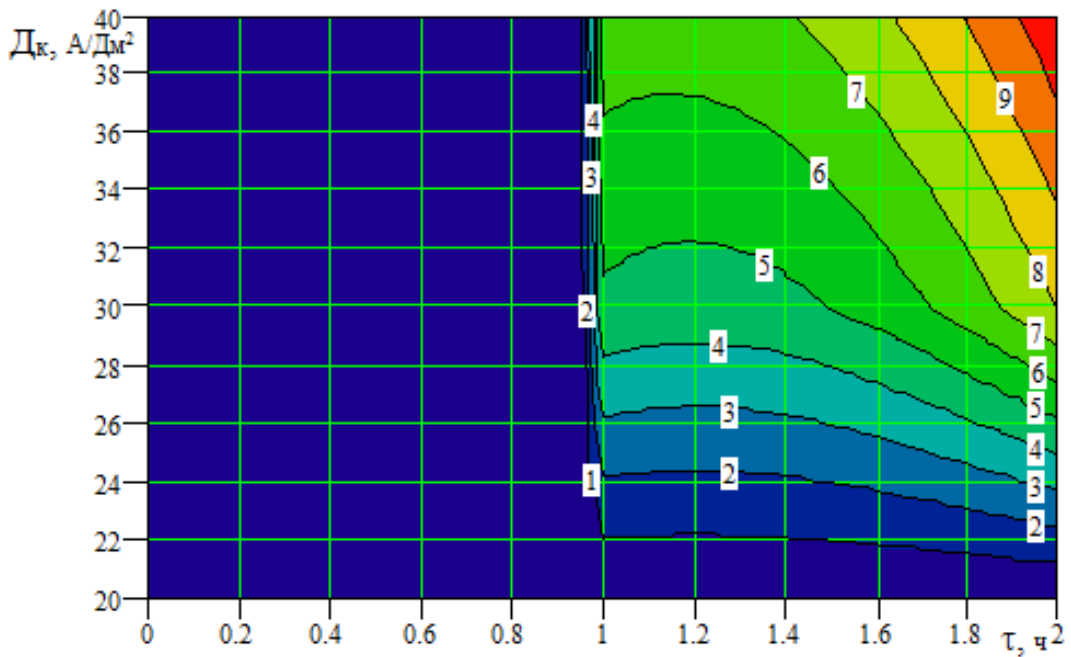


Рис. 3.18 Линии равного уровня значений среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k) при фиксированном значении температуры электролита $T=70\text{ }^\circ\text{C}$

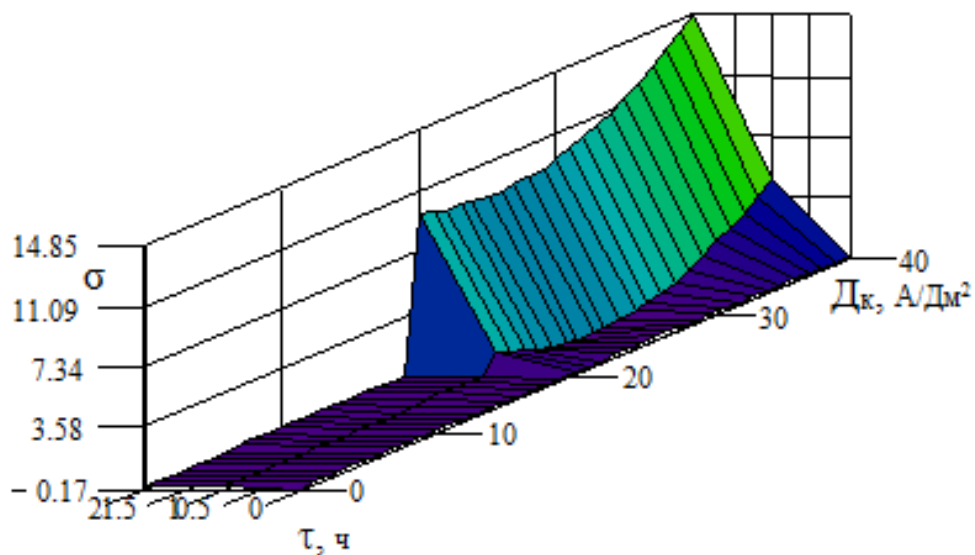


Рис. 3.19 Поверхность отклика в исследуемом факторном пространстве в зависимости среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности

электролиза (τ) и плотности тока (D_k), при фиксированном значении температуры электролита $T=70\text{ }^\circ\text{C}$

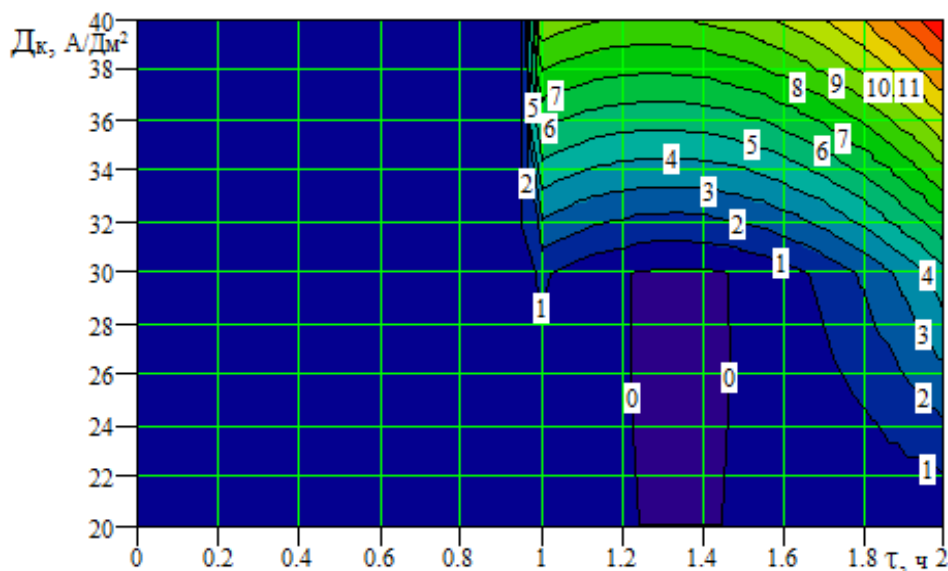


Рис. 3.20 Линии равного уровня значений среднеквадратического отклонения (σ) от продолжительности электролиза (τ) и плотности тока (D_k) при фиксированном значении температуры электролита $T=70\text{ }^\circ\text{C}$

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.

3.6 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.

3.6.1 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.

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:

$$V = \Delta\varphi_{\text{равн}} + \Delta\varphi_{\text{ом}} + \eta_{\text{конц}} + \eta_{\text{хим}}, \quad (3.19)$$

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

$$W = W_0 + W_1 + W_2. \quad (3.20)$$

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, 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:

$$D_k = \frac{ZFД}{\sigma(C_0 - C)}, \quad (3.21)$$

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:

$$D_k = \frac{ZFД}{\sigma C_0}. \quad (3.22)$$

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:

$$-\varphi = a + v \ln \left(\frac{i_k}{I \frac{i_k}{i_{пр}}} \right) \quad (3.23)$$

Из уравнения (3.23) видно, что пока $I < I_{пр}$, последний член равен $v \cdot \ln i$. При этом выражение принимает обычный вид уравнения электрохимической кинетики:

$$-\varphi = a + v \cdot \ln i. \quad (3.24)$$

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.

3.6.2 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. 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:



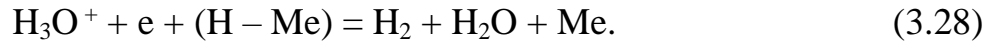
Поскольку ион водорода в растворе гидратирован, стадию его разряда можно представить в виде:



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 :

$$\frac{RT \ln p^1}{p} = \frac{2\sigma V}{r}, \quad (3.29)$$

где R – газовая постоянная; T – температура; σ – поверхностное натяжение; V – молярный объем.

Из уравнения (3.29) 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 :

$$F = \frac{4}{3\pi r^3 \rho g}, \quad (3.30)$$

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. 3.21 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.

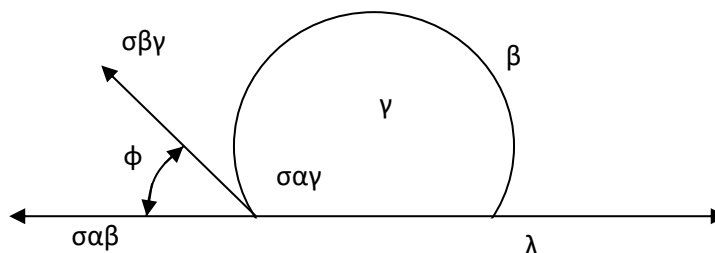


Рис. 3.21 Равновесное состояние пузырька водорода, выделяющегося на поверхности осаждаемой детали (катоде)

Условием равновесия будет соблюдено равенство:

$$\sigma_{\alpha\beta} + \sigma_{\beta\gamma} \cos \vartheta = \sigma_{\alpha\gamma}, \quad (3.31)$$

или

$$\cos \vartheta = \frac{(\sigma_{\alpha\gamma} - \sigma_{\alpha\beta})}{\sigma_{\beta\gamma}}. \quad (3.32)$$

В зависимости от величины трех межфазовых натяжений краевой угол ϕ будет велик или мал (рис. 3.21). 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. 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.

3.6.3 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

$$r_r = K \cdot r, \quad (3.33)$$

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 (3.33). 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:

$$b = \frac{V_{\Gamma}}{V_{\text{ж}} + V_{\Gamma}}, \quad (3.34)$$

где b – газовое наполнение; $V_{\text{ж}}$ – объем жидкой фазы в электролите; V_{Γ} – объем газовой фазы в электролите.

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 [65, 66]. Конусность покрытия $\rho_{\text{п}}$ 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.

3.6.4 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 [67]. Неравномерность газонаполнения выделяющимся водородом и растворенным в электролите кислородом в межэлектродном пространстве влияет на равномерность распределения толщины наносимого покрытия по длине и диаметру детали. 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 [68–71]. На их основе разработан принципиально новый способ формирования покрытия в контролируемой разреженной атмосфере над зеркалом гальванической ванны (патент № 2082835) [72]. 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 [73].

На рис. 3.22 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.

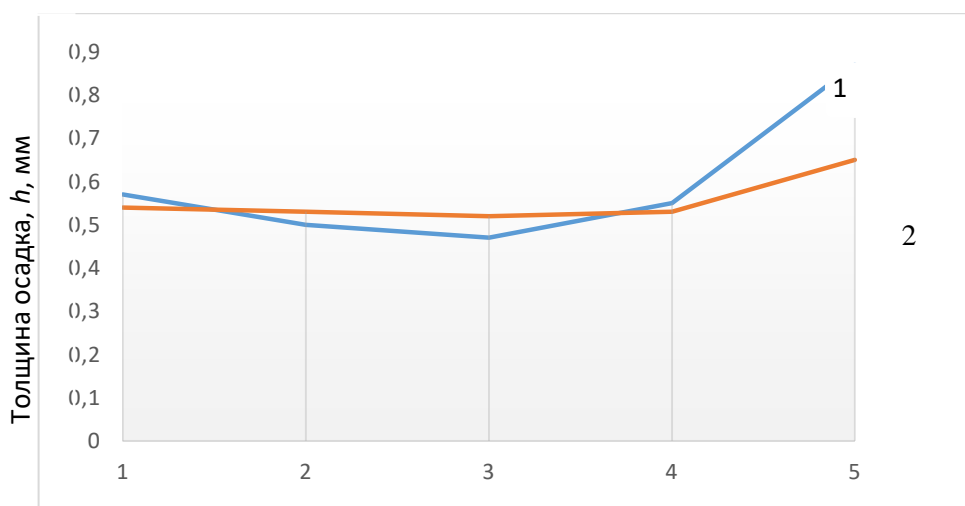


Рис. 3.22 Распределение электролитического железного покрытия по длине образца, в обычных условиях (1) и при разрежении над зеркалом электролита (2)

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, подчиняется нормальному закону распределения. При замерах образца в поясе 3 (рис. 3.22), 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. На покрываемой поверхности железоуглеродистых 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. 3.23, 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 [73, 74]. 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. 3.23), что способствует более равномерному распределению силовых линий по формируемой поверхности. 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. 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. Качество точности образцов, формообразованных электролитическим железным покрытием в обычных условиях, JT16, а при разрежении JT10.

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. 3.24).

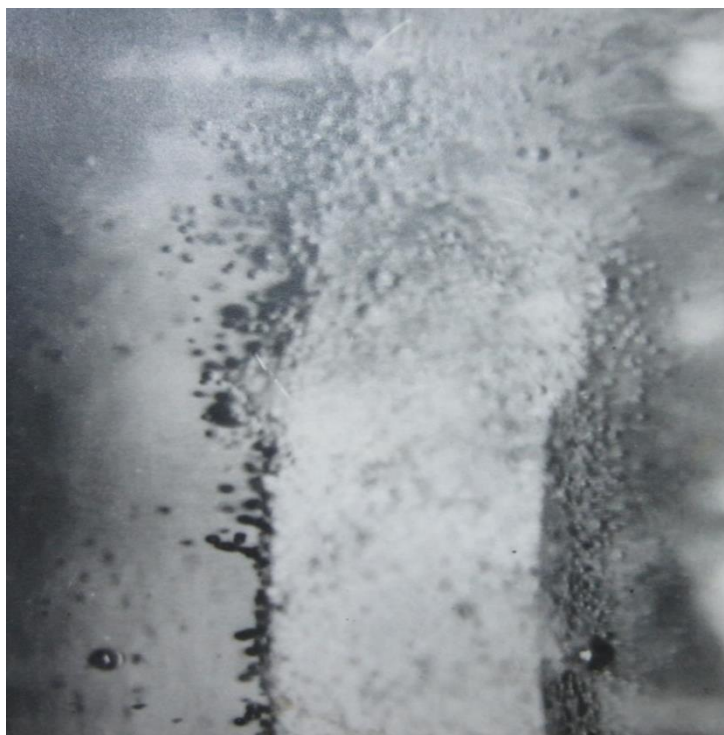


Рис. 3.23 Десорбция водорода с покрываемой поверхности образца при разрезании над зеркалом электролита



Рис. 3.24 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. 3.25). 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». Все факторы электролиза, приводящие к уменьшению вероятности образования зародышей пузырьков водорода и увеличению скорости их роста, препятствуют возникновению питтинга и водородной пористости в покрытиях.

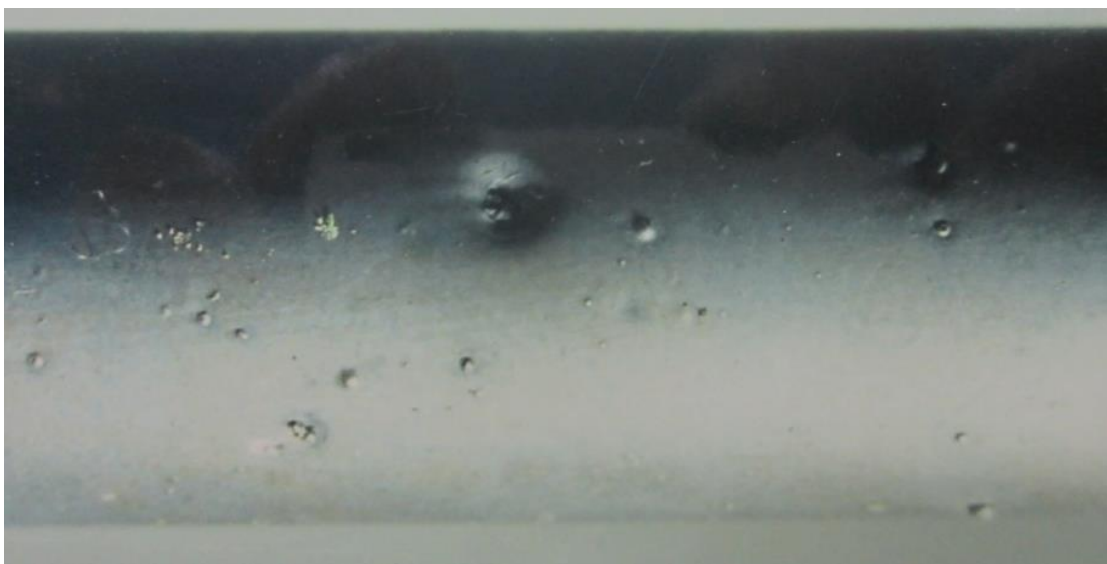


Рис. 3.25 Питтинг на поверхности образца, вследствие длительной адсорбции водорода

В общем случае пористость гальванопокрытий зависит от условий электролиза и в значительной степени определяется соотношением скоростей зарождения центров кристаллизации и их роста. 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. 3.26).

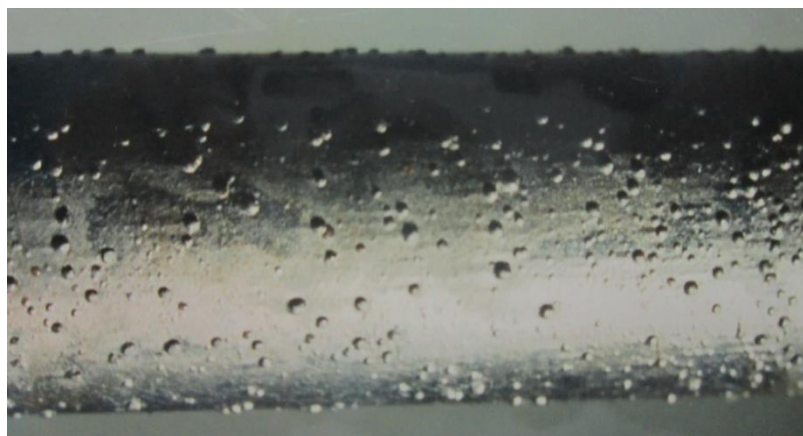


Рис. 3.26 Дендритообразование при железнении в обычных условиях

На образцах, полученных в условиях разрежения над зеркалом электролита, этих дефектов не наблюдается. 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. 3.27).



Рис. 3.27 Образец, полученный при железнении с созданием разрежения над зеркалом электролита

На рис. 3.28, 3.29 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 [75]. 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. 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).

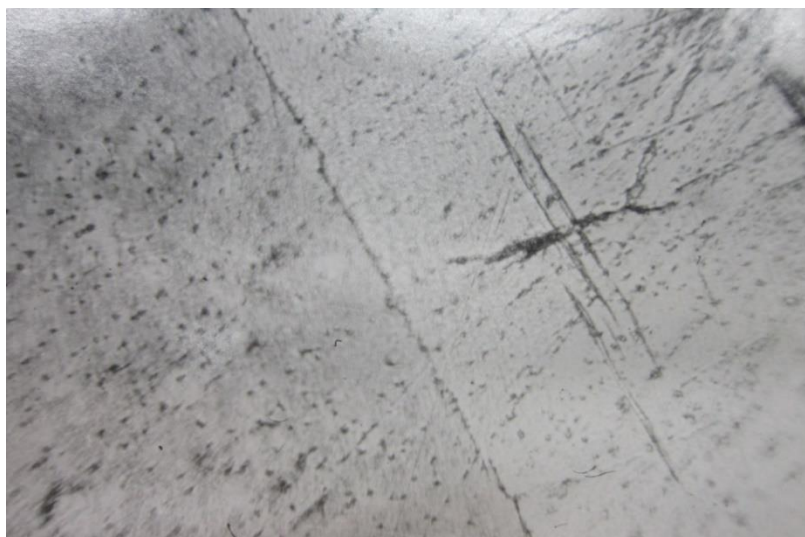


Рис. 3.28 Структура электролитического железа, полученного в обычных условиях

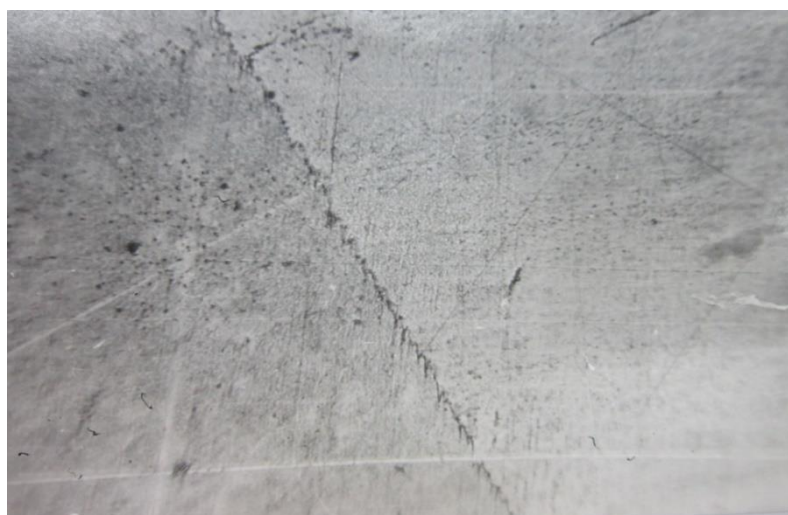


Рис. 3.29 Структура электролитического железа, полученного при разрезании над зеркалом электролита

Причина образования многоатомных слоев роста – пассивация катода в результате адсорбции на гранях растущего кристалла различного рода веществ. 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. 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 наложения двумерных зародышей формирует слой или «пакет» роста. Толщина «пакета» зависит от ряда факторов и определяется концентрацией разряжающихся ионов металла в зоне наложения зародышей и степенью пассивации его поверхности. После завершения развития «пакета» по нормали происходит его тангенциальный рост вдоль поверхности грани. 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. 3.30).

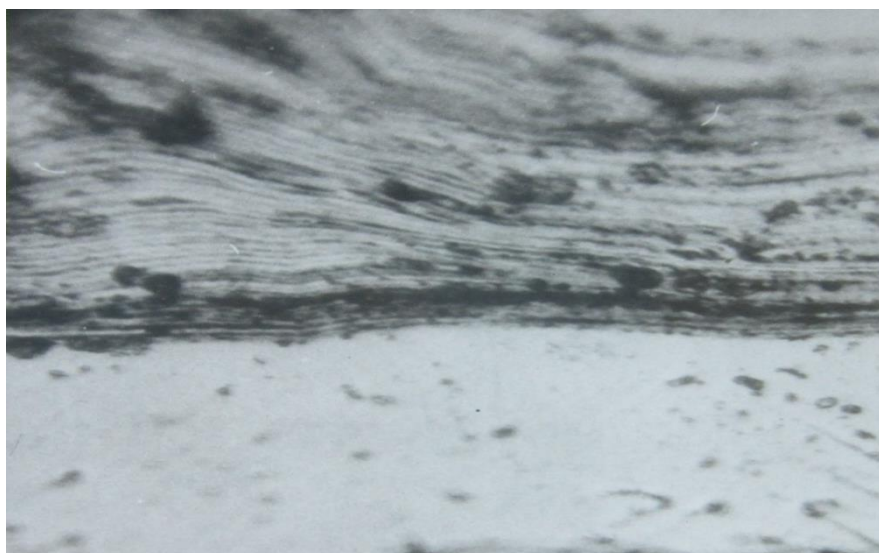


Рис. 3.30 Слоистость структуры электролитического железа, полученного в обычных условиях электролиза

Совершенство структуры кристаллов, растущих по механизму слоистого роста, главным образом, определяется характером двумерного зародышеобразования в период возникновения нового слоя «пакета». Зарождение каждого последующего слоя начинается с появления двумерного 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. 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. 3.13, 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 [76]. Из всех испытанных В.А. Шадричевым видов металлопокрытий [77] наибольшую износостойкость показали электроосажденные металлы: хром и железо, которые имеют однотипную структуру (с выраженной текстурой), отличную от структуры обычных металлургических металлов [78, 79]. Выявленный в отдельных исследованиях низкий коэффициент трения электролитического железа объясняется, по-видимому, также особенностью структуры электролитических осадков [80].

Другой характерной особенностью структуры покрытий железа является наличие трещин (рис. 3.31), 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 [81, 82, 83].

Характер трещиноватости, главным образом, зависит от структурных особенностей осадков, а также от наличия в них неметаллических включений (частиц гидроокиси, продуктов их распада). 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 [84]. 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. 3.29).

3.7 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 %.

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 саморасстворение поверхности в кислых электролитах и осаждение на ней гидроокисных соединений железа, препятствующих образованию адгезионной связи между электролитическим железом и железоуглеродистым сплавом.

3. 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.

4. 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.

При температуре электролита 70 °С за счет создания допустимой степени разреженности средняя высота микронеровностей поверхности осадка уменьшается в 2,5 раза.

5. 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Транспортная стратегия Российской Федерации [Текст]. – М.: Транспорт, 2003. – 28 с.
2. 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.
3. Денисов, А.С. Основы формирования эксплуатационно-ремонтного цикла автомобилей [Текст] / А.С. Денисов. – Саратов: СГТУ, 1999. – 352 с.
4. Фасхиев, Х.А. Проблемы качества в автомобилестроении [Текст] / Х.А. Фасхиев, О.А. Ситникова // Машиностроитель. – 2000. – № 1. – С. 34-39.
5. Фасхиев, Х.А. Показатели конкурентоспособности и качества грузовых автомобилей [Текст] / Х.А. Фасхиев, И.М. Костин // Стандарты и качество. – 2003. – № 4. – С. 56-60.
6. Фасхиев, Х.А. Качество – основа выживания автомобильной промышленности [Текст] / Х.А. Фасхиев // Стандарты и качество. – 2001. – № 4. – С. 66-68.
7. Трифонов, О.Н. На стадии проектирования [Текст] / О.Н. Трифонов // Стандарты и качество. – 2001. – № 4. – С. 47.
8. Азаматов, Р.А. Восстановление деталей силового агрегата КамАЗ-740.11-240 (Euro-1) [Текст] / Р.А. Азаматов, А.С. Денисов, А.Т. Кулаков, П.Г. Курдин. – Набережные Челны: КамАЗтехобслуживание, 2007. – 307 с.
9. 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.
10. Авдонькин, Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1993. – 352 с.

11. Костецкий, Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин [Текст] / Б.И. Костецкий. – Киев: Машгиз, 1959. – 478 с.
12. Денисов, А.С. Обеспечение надёжности автотракторных двигателей [Текст] / А.С. Денисов, А.Т. Кулаков. – Саратов: СГТУ, 2007. – 422 с.
13. Денисов, А.С. Изменение технического состояния двигателей в межремонтном периоде [Текст] / А.С. Денисов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1982. – № 9.– С. 47-49.
14. Авдонькин, Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1985. – 215 с.
15. Авдонькин, Ф.Н. Прогнозирование изменения технического состояния подшипников коленчатого вала [Текст] / Ф.Н. Авдонькин, А.С. Денисов // Автомобильная промышленность. – 1975. – №7. – С.
16. Асоян, А.Р. Восстановление шатунов автотракторных двигателей [Текст] / А.С. Денисов, А.Р. Асоян, В.М. Юдин. – Саратов: СГТУ, 2008. – 100 с.
17. Асоян, А.Р. Анализ изменения технического состояния ресурсоопределяющих элементов дизелей КАМАЗ в процессе эксплуатации [Текст] / А.Р. Асоян, А.С. Денисов, В.П. Захаров // Известия ВолгГТУ. – 2011. – №8. – С. 32-35.
18. Анализ физико-механических свойств металла коленчатых валов, восстановленных нанесением наплавочных металлопокрытий [Текст] / А.Р. Асоян [и др.] // Автотранспортное предприятие. – 2012. – №4. – С. 45-48.
19. 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.
20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. Денисов, А.С. Эффективный ресурс двигателей [Текст] / А.С. Денисов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. – 108 с.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. Лавринович, Е. Предупредительный ремонт и ресурс двигателей [Текст] / Е. Лавринович, И. Ярошонок // Автомобильный транспорт. – 1978. - № 1. – С. 38.
30. Слабов, Е.М. Необходимость предупредительного ремонта двигателей ЯМЗ-238 [Текст] / Е.М. Слабов, М.А. Григорьев // Автомобильный транспорт. – 1971. – № 5.– С. 24-25.
31. Асоян, А.Р. Повышение качества заготовок, формируемых электролитическим железным покрытием [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.Р. Асоян. – Саратов, 1999. – 157 с.
32. 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.
33. Вайнер, Я.В. Технология электрохимических покрытий [Текст] / Я.В. Вайнер, М.А. Дасоян. – Л.: Машиностроение, 1972. – 464 с.
34. Вячеславов, П.М., Электролитическое формирование [Текст] / П.М. Вячеславов, Г.А. Воленюк. – Л.: Машиностроение, 1979. – 198 с.
35. Добош, Д.А. Электрохимические константы [Текст] / Д.А. Добош; пер. с англ. и венг.; под ред. Я.М.Колотыркина. – М.: Мир, 1980. – 365 с.
36. Кабанов, Б.Н. Электрохимия металлов и адсорбция [Текст] / Б.Н. Кабанов. – М.: Наука, 1965. – 222 с.
37. Левин, А. И. Теоретические основы электрохимии [Текст] / А.И. Левин. – М.: Металлургия, 1972 – 543 с.
38. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.
39. 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.

40. 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.

41. Мелков, М.П. Восстановление автомобильных деталей твердым железом [Текст] / М.П. Мелков, А.Н. Швецов, И.М. Мелкова. – М.: Транспорт, 1982. – 198 с.

42. 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.

43. Петров, Ю.Н. Электролитическое осаждение железа [Текст] / Ю.Н. Петров [и др.] – Кишинев: Изд-во АН Молдавской ССР, 1990. – 194 с.

44. 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

45. 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.

46. Митряков, А.В. Основы обеспечения надежности восстановительной технологии [Текст] / А.В. Митряков. – Саратов: СПИ, 1989. – 394 с.

47. Дамаскин, Б.Б. Адсорбция органических соединений на электродах [Текст] / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, В.В. Батраков. – М.: Наука, 1968. – 323 с.

48. Шаповалов, В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродных сплавов [Текст] / В.И. Шаповалов. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.

49. 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. сельхозхоз. ин-т, 1972. – Т.87. – С. 88-92.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. Скорчеллетти, В.В. Теоретическая электрохимия [Текст] / В.В. Скорчеллетти. – Л.: Химия, 1969. – 608 с.

54. 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.

55. 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.

56. Белоглазов, С.М. Наводораживание стали при электрохимических процессах [Текст] / С.М. Белоглазов. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1975. – 412 с.

57. Каданер, Л.И. Равномерность гальванических покрытий [Текст] / Л.И. Каданер. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1961. – 414 с.

58. Митряков, А.В. Надежность восстановительной технологии (анализ, синтез, прогнозирование) [Текст] / А.В. Митряков. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 184 с.

59. 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

60. 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.

61. 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.

62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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; опубли. 27.06.1995. – 6 с.

73. Асоян, А.Р. Точность размеров, формы и качество поверхности заготовок, формобразуемых 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.

74. Чугаев, Р.Р. Гидравлика [Текст] Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

75. Штернберг, А.А. Морфология, кинетика и механизм роста кристаллов [Текст] / А.А. Штернберг // Рост кристаллов. – М.: Наука, 1972. – Т.9. – С. 34 – 41.

76. Поветкин, В.В. Структура электролитических покрытий [Текст] / В.В. Поветкин, И.М. Ковенский. – М.: Metallургия, 1989. – 135 с.

77. Шадричев, В.А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлопокрытиями [Текст] / В.А. Шадричев. – М.-Л.: Машгиз, 1962. – 296 с.

78. Gawne D.T. Failure of electrodeposited chromium coatings on cast iron substrates / D.T. Gawne // Metallurgical and protective coatings – 1984. – P.385-393.

79. Shingo Nomura. Zn-Fe/Zn-Ni Double-layer electroplated steel sheet / Nomura Shingo, Sakai Hirohiko // Technical Report. – 1983. – №23. – P. 930-938.

80. Гурьянов, Г. В. Электроосаждение износостойких композиций [Текст] / Г.В. Гурьянов. – Кишинев: Штиица, 1985. – 237 с.

81. 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.

82. 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.

83. Швецов, А.Н. Основы восстановления деталей осталиванием [Текст] / А.Н. Швецов. – Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1973. – 143 с.

84. Поперека, М.Я. Внутренние напряжения электролитически осаждаемых металлов [Текст] / М.Я. Поперека. – Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1966. – 335 с