

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ – МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»
(ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева)

На правах рукописи

ЛОГАЧЁВ КОНСТАНТИН МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ
ФОРСУНОК АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ТЕРМИЧЕСКИМ
РАЗЛОЖЕНИЕМ СОЕДИНЕНИЙ ГЕКСАКАРБОНИЛА ХРОМА**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Казанцев Сергей Павлович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1. Производство, эксплуатация и отказы топливной аппаратуры	11
1.2. Номенклатура распылителей форсунок	16
1.3. Анализ износа деталей распылителя форсунки.....	22
1.4. Анализ решения проблемы износа	41
1.5. Способы восстановления и упрочнения распылителей форсунок	44
1.5.1. Диффузионная металлизация	45
1.5.2. Углерод – алмазные покрытия DLC	53
1.5.3. Ионно-плазменное напыление PVD	55
1.5.4. Химическая металлизация	56
1.6. Основные выводы, задачи и цели исследования	60
ГЛАВА 2. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДОХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ХИМИЧЕСКОЙ ПАРОФАЗНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ	63
2.1. Термодинамические условия осаждения карбидохромового покрытия при минимальной температуре CVD-метода	63
2.1.1. Термодинамика протекания химических реакций при осаждении карбидохромового покрытия	69
2.2. Определение необходимого уровня твёрдости и несущей способности карбидохромового покрытия	75
2.3. Определение необходимой толщины карбидохромового покрытия, обеспечивающей восстановление ремфнда распылителей в полном объёме.....	90
2.4. Выводы	95
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .	96

3.1. Программа проведения экспериментов	96
3.2. Объект и предмет исследования	96
3.3. Средства технологического оснащения процесса нанесения покрытий методом химической парофазной металлизации	98
3.4. Методика выбора оптимального режима осаждения карбидохромового покрытия.....	106
3.5. Методика определения макрогеометрии деталей распылителя.....	107
3.6. Исследование скорости формирования покрытий	108
3.7. Методика металлографических исследований	108
3.8. Определение микротвердостей покрытия и подложки.....	109
3.9. Рентгеноструктурный и масс-спектральный анализы покрытий.....	110
3.10. Исследование остаточных напряжений	111
3.11. Определение прочности сцепления покрытия с основой	113
3.12. Исследование износостойкости покрытий	113
3.13. Исследование коррозионной стойкости покрытий.....	115
3.14. Методика проведения эксплуатационных испытаний восстановленных деталей.....	116
3.15. Методика обработки экспериментальных данных	117
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	118
4.1. Возможность получения покрытий при низкотемпературном осаждении....	118
4.2. Планирование эксперимента.....	124
4.3. Исследование микротвёрдости карбидохромового покрытия	137
4.4. Рентгеноструктурный и масс-спектральный анализы покрытий.....	140
4.5. Остаточные напряжения.....	142
4.6. Сцепляемость покрытия с подложкой	143

4.7. Износостойкость покрытий.....	145	
4.8. Исследование коррозионной стойкости	147	
4.9. Эксплуатационные испытания распылителей форсунок	149	
4.10. Выводы	149	
ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КАРБИДОХРОМОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ		151
5.1. Структура технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома.....	151	
5.2. Экономическая эффективность восстановления распылителей.....	157	
5.2.1. Расчёт экономической эффективности от внедрения технологии восстановления распылителей форсунок	164	
5.3. Оценка стоимости владения дизельной техники при изнашивании распылителей форсунок	171	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	180	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	182	
ПРИЛОЖЕНИЕ	210	

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в АПК России особенно актуальны задачи усиления продовольственной безопасности, повышения конкурентоспособности отечественной продукции и ускоренного социально-экономического развития страны. В связи с уходом зарубежных производителей назрела острая необходимость в развитии импортозамещающих технологий, направленных на повышение надёжности сельскохозяйственной техники и оборудования [194, 218].

Энерговооружённость сельскохозяйственной техники РФ в сравнении с другими странами по данным Росстата показывает, что в настоящее время в России на 1000 га пашни приходится 3 трактора и 2 зерноуборочных комбайна в то время как в Германии, соответственно, 65 и 11,5, США 25,9 и 17,9, Канаде 16 и 7, Беларуси 9,3 и 5, а в Казахстане 6,4 и 2,8. Текущие темпы производства отечественной сельскохозяйственной техники способны обеспечить обновление лишь 4% парка в год [80, 189, 198].

К сельскохозяйственным машинам, работающим в тяжёлых условиях, предъявляются высокие требования по надёжности. Основная причина потери работоспособности машин – низкая износо- и коррозионная стойкость деталей. Надёжность и экономичность автотракторных дизелей во многом определяются стабильной и безотказной работой топливной аппаратуры (ТА), качество которой не удовлетворяет современным требованиям. Более 40% отказов дизелей обусловлено нарушением работы топливоподающей системы. Из общего числа отказов топливной аппаратуры на форсунку ДВС приходится 12%. Согласно проведенному мониторингу, не менее 66% неисправностей форсунок автотракторных дизелей приходится на распылитель [206]. В распылителе форсунки изнашиваются направляющие поверхности иглы и корпуса распылителя, уплотнительные их конусные поверхности и распыляющие отверстия [20].

Основная причина низкой износо- и коррозионной стойкости рабочих поверхностей прецизионных деталей – это загрязнённость дизельного топлива.

Дизельное топливо является гетерогенной смесью, так как загрязняется на всех этапах транспортировки от завода до топливного бака машины и в процессе эксплуатации машинно-тракторных агрегатов (МТА). Последнее происходит из-за того, что МТА перемещаются по большим земельным площадям и работают в пылевом облаке, которое содержит в себе твёрдые абразивные частицы кварца SiO_2 , корунда Al_2O_3 и других веществ. В результате этого пыль проникает в топливный бак через сапун и смешивается с топливом [86].

Фильтра тонкой очистки способны задерживать загрязняющие вещества размером до 3х мкм и имеют степень очистки 85...98%. Износ деталей происходит из-за высокой микротвёрдости абразивных частиц в сравнении с микротвёрдостью деталей [70, 102].

Обеспечить высокую надёжность распылителей форсунок возможно с помощью совершенствования системы очистки топлива и значительного повышения физико-механических свойств рабочих поверхностей деталей. Первый путь ограничивается качеством применяемых фильтров очистки топлива. Вторым путем, которому посвящена данная работа, должен обеспечивать безыносную эксплуатацию прецизионных деталей в условиях повышенного содержания абразива в топливе. Это достигается за счёт применения упрочняющих покрытий, имеющих микротвёрдость значительно превышающую микротвёрдость абразивных частиц.

В настоящее время существует большое количество способов восстановления и упрочнения прецизионных деталей ТА, которые не отвечают технико-экономическому критерию от их внедрения. Поэтому разработка новой технологии по увеличению ресурса прецизионных деталей распылителей форсунок дизельных двигателей является актуальной задачей.

Степень разработанности. В настоящее время вопросами повышения надёжности прецизионных деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей активно занимаются ВУЗы, конструкторские отделы заводов-изготовителей и отраслевые НИИ. Проблема восстановления и упрочнения деталей ТА до сих пор не решена.

Вопросами создания новых способов повышения надёжности сельскохозяйственной техники и развития технологии ремонта посвящены работы, в том числе автотракторных дизелей, Балабанова В.И., Батищева А.Н., Богачёва А.Б., Бугаева В.Н., Бурумкулова Ф.Х., Воловика Е.Л., Гайдара С.М., Галиновского А.Л., Голубева И.Г., Денисова В.А., Дорохова А.С., Ерохина М.Н., Казанцева С.П., Козырева В.В., Коломейченко А.В., Кряжкова В.М., Лялякина В.П., Михлина В.М., Некрасова С.С., Мазаева Ю.В., Поляченко А.В., Пучина Е.А., Сергеева В.З., Черноиванова В.И., Чупятова Н.Н., Шаповалова С.Р., Юдина В.М. и других учёных.

Предлагаемые конструкторские решения не позволяют повысить износостойкость прецизионных деталей, а упрочняющие технологии не обеспечивают нанесение покрытий на труднодоступные рабочие поверхности с малыми диаметрами. Кроме того, большинство известных способов не позволяют наносить достаточную толщину износостойких покрытий для восстановления размеров изношенных деталей и имеют высокотемпературный режим, который приводит к отпуску применяемых сталей.

Ярославский завод топливной аппаратуры применяет DLC покрытия с целью упрочнения плунжерных прецизионных поверхностей. Температурный режим технологии 400...600°С. Микротвёрдость покрытия 2000...3000 HV или 19 500...30 000 МПа. Толщина покрытия 0,3...0,8 мкм. Применяемое оборудование импортное и имеет низкую производительность, что ограничивает возможность серийного выпуска упрочнённых деталей. Данная технология не позволяет наносить упрочняющее покрытие на внутренние поверхности деталей.

Для повышения надёжности прецизионных деталей ТА необходимо разрабатывать новые способы упрочнения.

Наиболее перспективной технологией формирования износостойких покрытий на деталях машин является CVD-метод металлоорганических соединений (МОС). Данный метод позволяет получать карбидохромовые покрытия микротвёрдостью до 19 ГПа, полученных при температуре осаждения более 200°С. Однако, при этой температуре, одновременно процессу осаждения покрытия,

происходит низкий отпуск деталей, что вызывает необходимость проведения дополнительной термообработки. Поэтому исследования в области совершенствования CVD-метода по снижению температуры осаждения упрочняющих покрытий на стальные детали машин являются актуальными.

Цели и задачи исследования. Разработать низкотемпературную технологию восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома. Создать устройство для осаждения карбидохромовых покрытий на внутренние труднодоступные поверхности корпуса распылителя форсунки. Получить количественные и качественные характеристики карбидохромовых покрытий.

Научная новизна. Теоретически установлена возможность осаждения карбидохромового покрытия CVD-методом на труднодоступные поверхности стальных деталей при температуре ниже 200 °С путём уменьшения внутренней энергии термодинамических реакций разложения соединений гексакарбонила хрома. Установлена критическая толщина карбидохромового покрытия, обеспечивающая работоспособность соединения «игла – корпус».

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработана технология восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома при температуре ниже 200 °С, исключающей коробление и их повторную закалку;
- разработано устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки (Патент РФ на полезную модель RU 216021 U1 [222]);
- упрочнение обеих деталей прецизионного соединения «игла-корпус» обеспечивает повышение ресурса распылителя форсунки в 2,5 и более раза.

Методология и методы исследования. В основу теоретических исследований положены законы термо- и гидродинамики, основные положения теории упругости и надёжности, методы физического и математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены с использованием

современных приборов, аппаратуры и стендов, стандартных методик, международных стандартов, теории вероятностей и математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

- термодинамические условия осаждения карбидохромового покрытия при минимальной температуре CVD-метода;
- методика определения критической и оптимальной толщины карбидохромового покрытия на деталях распылителя форсунки;
- режимы CVD-метода, обеспечивающие низкотемпературное осаждение карбидов хрома;
- физико-механические свойства упрочняющего покрытия;
- результаты лабораторных и эксплуатационных испытаний восстановленных распылителей форсунок автотракторных дизелей;
- технико-экономическая оценка результатов исследований.

Степень достоверности и апробация результатов. Материалы диссертации доложены, обсуждены и одобрены в рамках следующих мероприятий:

- международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева., Москва 5-7 июня 2023 г;
- семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского» РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева., Москва, 25 января 2023;
- патент на полезную модель «Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки» (RU 216021 U1), 13 января 2023;
- победитель конкурса, фонд содействия инновациям ООО «ВЕК–21» МОСКОВСКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ СТАРТ – 2022 «Умник»; Направление Н4 - Новые приборы и интеллектуальные производственные технологии// Разработка инновационной автоматизированной установки для нанесения износостойких покрытий на стальные детали машин., Москва, 07 декабря 2022;
- восьмая всероссийская молодёжная научно-практическая конференция «СТУДЕНЧЕСТВО РОССИИ: ВЕК XXI»., Орёл, 15 декабря 2021;

– международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвященная 155-летию РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева., Москва, 02–04 декабря 2020;

– XXVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», Москва 13-17 апреля 2020.

Материалы исследования внедрены в учебный процесс Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева на кафедре «Сопротивление материалов и детали машин».

Научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 11 работах, в том числе 2 статьи в изданиях ВАК, 1 монография и 1 патент на полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Работа изложена на 216 страницах машинописного текста и содержит 22 таблицы, 63 рисунка и 3 приложения. Список литературы включает 252 источника.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Производство, эксплуатация и отказы топливной аппаратуры

Отечественное производство сельхозмашиностроения характеризуется высокими производственными издержками, низкими показателями реализации и объёмами выпуска. Основной проблемой для машиностроительных предприятий является недостаточный спрос на продукцию на внутреннем рынке, высокий уровень налогообложения, недостаток финансовых средств, высокий процент коммерческого кредита, конкурирующий импорт, изношенность оборудования. Следует отметить также дефицит инженеров-технологов, инженеров-конструкторов, исследователей в прикладных институтах машиностроения, старение кадров, снижение уровня квалификации [94].

На сегодня в Российской Федерации насчитывается около 100 заводов по производству сельхозмашин, которые выпускают свыше 50 видов современной техники. Актуальная проблема практически всех субъектов сельхозмашиностроения — это низкий уровень модернизации.

Несмотря на это, агропромышленный комплекс Российской Федерации существенно развивается. Работа в условиях экономических санкций привела к необходимости в формировании прорывных решений и технологий по внедрению платформы долгосрочного и перспективного развития АПК для устойчивого социально-экономического развития, снижения импортозависимости, повышения конкурентоспособности отечественной продукции, усиления продовольственной безопасности, развития научной направленности и эффективного использования земель сельскохозяйственного назначения. Для достижения поставленных целей и развития села государство разрабатывает новые программы по субсидированию сельхозтоваропроизводителей (СХТП) и изготовителей сельскохозяйственной техники и оборудования, а также выделяются дотации и гранты.

Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения РФ на период до 2030 г., определяет развитие агросектора путём повышения уровня конкурентоспособности выпускаемой техники. Основой повышения конкурентоспособности продукции сельскохозяйственного машиностроения является развитие производства современных компонентов и материалов на территории Российской Федерации. Это обеспечит усиление продовольственной безопасности и снизит стоимость производства сельскохозяйственной продукции [194]. В отечественное сельскохозяйственное производство внедряются новые высокоэффективные технологии, которые позволяют российским производителям техники и оборудования конкурировать на мировом рынке.

Энерговооружённость сельскохозяйственной техники РФ, в сравнении с другими странами, по данным Росстата, показывает, что в настоящее время в России на 1000 га пашни приходится 3 трактора и 2 зерноуборочных комбайна в то время как в Германии, соответственно, 65 и 11,5, США 25,9 и 17,9, Канаде 16 и 7, Беларуси 9,3 и 5, а в Казахстане 6,4 и 2,8.

Согласно статистическим данным за последние 30 лет резко увеличилась наработка на один трактор. Раньше на обработку одного гектара земли приходилось в три раза больше тракторов, чем сейчас. Это объясняется тем, что машины стали более энергонасыщенными, и спрос отечественного производителя сельскохозяйственной продукции сместился в сторону более мощной техники. Однако, оснащённость сельского хозяйства России в сравнении с Канадой, которая схожа по почвенно-климатическим условиям, урожайности и контурности полей, остаётся на крайне низком уровне. Аналогичная ситуация наблюдается с уборочными сельскохозяйственными машинами. Текущие темпы производства отечественной сельскохозяйственной техники способны обеспечить обновление лишь 4% парка в год. Отсутствие и низкая надёжность техники влияет на агросроки возделывания культур и потере урожая [80, 157, 198].

Современный рынок насчитывает большое количество производителей сельскохозяйственной техники. Уровень надёжности машин во многом определяется правильной их эксплуатацией. Эксплуатация любой единицы

техники одинакового класса, но разного производителя, индивидуальна, так как требуются определенные знания. Зачастую, работа двигателя на критических или близко критическим оборотам, неправильный выбор передачи, активная работа гидравлической системы, превышение скоростного режима и т.д., ведёт к внеплановому простоя машины. Износ узлов и агрегатов приводит к ухудшению технических характеристик машин.

В целях поддержания высокого уровня технической готовности автотракторной техники и снижения рисков отказов, связанных с антропогенным фактором, при эксплуатации машин многие изготовители внедряют пассивную систему безопасности, которая позволяет снизить риск аварийной остановки.

Современная тенденция развития сельского хозяйства ведёт к автоматизации и цифровизации производства продукции, что позволяет исключить человеческий фактор из эксплуатации техники [78, 176]. В результате этого увеличивается наработка, повышается эффективность использования машины и парка техники, а также снижаются внеплановые простои и ремонты.

В настоящее время дилеры сельскохозяйственной техники проводят обучение и инструктаж операторов, чтобы снизить затраты на гарантию и исключить человеческий фактор из эксплуатации машины, так как от квалификации персонала напрямую зависит эффективность использования машин [241, 248]. Кроме этого, трактора, комбайны и другие самоходные сельскохозяйственные машины оборудуются телематической системой [78, 176]. Она снимает показания с датчиков, записывает их в бортовой компьютер и передаёт данные на сервер (или скачивается с бортовой системы с помощью сервисного инструмента) для последующего анализа. Это позволяет отслеживать, оценивать правильность эксплуатации каждой единицы техники, например, время работы, расход топлива, температуру, загрязнённость технических жидкостей, режим работы систем и узлов, траекторию, скорость передвижения, местонахождение, производительность и другие параметры.

Отечественная сельскохозяйственная техника, в сравнении с зарубежной, имеет более низкую надёжностью узлов и агрегатов. Как правило, внеплановый

выход из строя единицы техники обуславливается потерей работоспособности агрегата или деталей систем машины. Недостаточный ресурс отдельных деталей приводит к увеличению числа простоев машин, что определяется увеличением стоимости владения машиной. В счёт низкого коэффициента технической готовности (КТГ) машин эксплуатирующие организации вынуждены закупать резервную технику, которая не позволит остановить производственные работы. Увеличение затрат негативно влияет на формирование себестоимости единицы произведённой продукции.

Использование техники зарубежного производителя для аграриев выгоднее, так как она более надёжна, что позволяет отказаться от использования резервных машин. Благодаря этому агросектор охотнее эксплуатирует импортные машины.

Для поддержания высокого уровня КТГ многие дилеры и производители техники ведут статистику по неисправностям машин, которая позволяет заранее исключать их простой путём проведения на них планово-предупредительных мероприятий по замене более слабых узлов и агрегатов в зависимости от наработки машины.

Согласно данным, [86, 124, 198] по отказам сельскохозяйственных машин отечественной техники, слабыми и менее надёжными узлами, по сравнению с другими системами, являются двигатель 33,5%, гидросистема 17,6% и трансмиссия 16,3%. В двигателе на топливную систему (ТС) приходится до 44% отказов. На рисунке 1.1 показаны данные мониторинга качества в условиях реальной эксплуатации топливной системы дизелей в зависимости от количества отказов на одну единицу техники в процентном соотношении.

Анализ статистики отказов топливной аппаратуры дизелей показывает, что на форсунку приходится 12,4% отказов, из которых не менее 66% неисправностей приходится на распылитель.

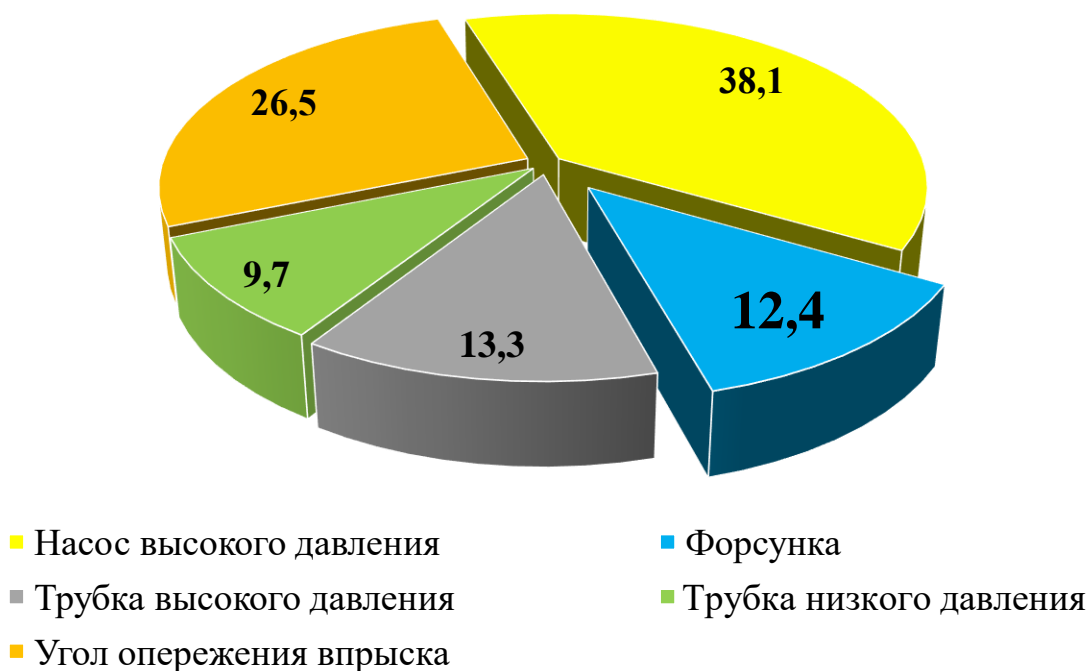


Рисунок 1.1 – Статистика частоты отказов топливной системы дизельных двигателей сельскохозяйственной техники отечественного производителя.

Основная причина низкой надёжности отечественной сельскохозяйственной техники — это снижение требований и количества контролируемых параметров при проведении сертификационных и предварительных (договорных) испытаний. Машиноиспытательным станциям, как главным инструментам государственного контроля за качеством выпускаемых заводами сельскохозяйственных машин, разрешено осуществлять коммерческую деятельность по испытаниям машин в целях самообеспечения. Принятие постановления Правительства Российской Федерации №740 от 1 августа 2016 года и вступление его в силу в 2020 году привело к сокращению количества критериев оцениваемых параметров техники. Кроме того, в данное постановление вошли не все группы машин. До принятия постановления новый трактор перед серийным выпуском должен был оцениваться более чем по ста критериям, теперь по десяти [187]. В свою очередь, с 2020 года не проводится мониторинг отказов сельскохозяйственной техники и оборудования, что привело к снижению количества отказов. С одной стороны, это улучшило статистику, а с другой большинство отказов стали невидимы [184, 209].

1.2. Номенклатура распылителей форсунок

Современная сельскохозяйственная техника оснащена дизельными двигателями. Главная задача двигателя - это передача крутящего момента к узлам и агрегатам машин. Надёжность и экономичность дизелей во многом определяется стабильной и безотказной работой топливной системы. Наиболее популярные топливные системы дизелей, которые наиболее часто встречаются в современных двигателях, это механическая и Common Rail. Отличительная особенность между ними – это управление впрыском.

Механическая система менее требовательна к качеству топлива, так как впрыск в камеру сгорания осуществляется за счёт увеличения давления топлива в топливной магистрали, идущей от топливного насоса высокого давления (ТНВД) до форсунки. Система Common Rail требует лучшей очистки топлива, а впрыск происходит за счёт подачи напряжения на электромагнитный клапан, установленный в форсунке. Эта система позволяет контролировать впрыск топлива. За один цикл впрыска топлива в камеру сгорания двигателя возможно осуществить до 90 подвпрысков, что обеспечивает лучшее сгорание топлива и повышает экологические характеристики двигателя.

Кроме того, в механической топливной системе 80% стоимости приходится на ТНВД и 20% на всё остальное. В Common Rail 80% стоимости от топливной системы приходится на форсунку.

Большинство отечественных сельскохозяйственных машин оснащаются дизельными двигателями, которые укомплектованы механической топливной системой. Наиболее популярные форсунки ФД-22, ФД-11, ФД-111, ФШ-62005, 171,1112010 и другие. Они имеют одинаковый принцип работы, но отличаются размерами. Кроме того, некоторые из них отличаются диаметром плунжерной части иглы и количеством распыляющих отверстий.

Несмотря на многообразие видов конструкций форсунок автотракторных дизелей основная причина низкого ресурса — это износ распылителей. Распылитель форсунки – это прецизионная пара, состоящая из корпуса и иглы распылителя, выполненная с соблюдением высокой точности геометрических

параметров (рисунок 1.2). Распылители во всех видах форсунок, включая используемые в системе Common Rail, имеют схожие конструктивные элементы (иглу и корпус), но также, как и форсунки, отличаются размерами. Распылители для механической ТС изготавливаются с диаметром направляющей иглы от 4,5 мм, а Common Rail размерами меньшими.

Распылители для механической топливной системы выпускаются на Алтайском заводе прецизионных изделий [7] и Ярославском заводе дизельной аппаратуры [8]. Устанавливаются на дизеля СМД, ТМЗ, Д240...260, КамАЗ и другие.

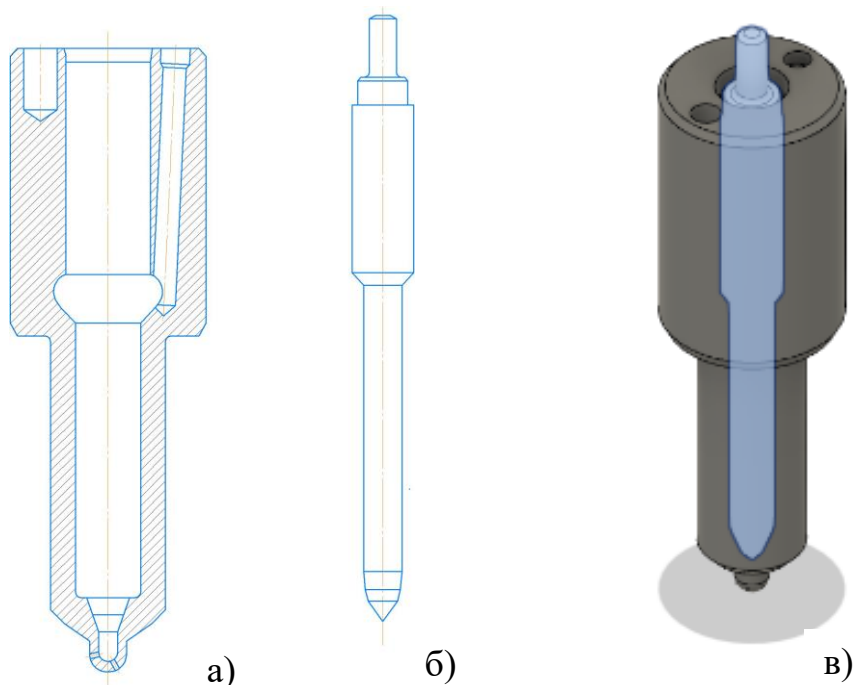


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема распылителя форсунки:

а – корпус; б – игла; в – распылитель в сборе.

Согласно производственным данным, полученным от сервисных организаций и основанным на существующих нормах расхода топлива и запасных частей, замена распылителей проводится при двухсменном режиме работы на каждый 25...40 календарный день или при наработке в 500...4000 мото-час [8, 20, 22, 77, 156]. Распылители форсунок системы Common Rail имеют ресурс более 15 000 мото-час, что позволяет безотказно эксплуатировать сельскохозяйственные

машины в течение двух и более лет. Нарботка отечественных распылителей до 4 раз меньше, чем у зарубежных [7, 8, 241, 244, 248]. Причинами отказов топливной системы отечественной техники является относительная низкая износостойкость деталей.

В таблице 1.1 представлена номенклатура и ресурс некоторых применяемых форсунок и распылителей на тракторах отечественного и зарубежного производителя.

Таблица 1.1 – Номенклатура и ресурс распылителей форсунок.

Трактор	Модель	Двигатель	Производитель, Номер распылителя/ форсунки	Наработка, мото - ч
Беларус	МТЗ-80...1221	Д-240/245/260	НЗТА 11.1112010-14 ЧЗПИ 39.1112010-05 ЯЗДА 273.1112010-20	500...4000
Кировец	К-700...744	ЯМЗ 236/238/240	ЯЗТА 26.111211 ЯЗТА 261.1112110 ЯЗДА 273.1112110-30	500...4000
Агромаш	ТГ-90/150 ТК-30/85/180	А-41СИ-02 / Д-442 Д120/145Т/ SISU66	АЗПИ 468-20с1 АЗПИ 11ТА-20с1 АЗПИ 204.1112110-1 НЗТА 16.1112010 Bosch DLLA151P2244	500...4000
John Deere	9R 8R	ECE-R120 Cummins X15	RE533501/RE524369 VNL4088665/4076902	~15000
Deutz-Fahr	6G	DEUTZ TCD 2012	DEUTZ 04290987 VOLVO 03050480 BOSCH 04290987	~15000

Некоторые фирмы по изготовлению форсунок, как Denso и Siemens, не выпускают отдельно распылители к некоторым форсункам [195, 242]. В таких форсунках ресурс распылителей равен ресурсу форсунки, что приводит к нецелесообразности выпуска запасных частей.

Распылители форсунок автотракторных дизелей изготавливаются следующим образом. Игла и корпус распылителя с запорными конусами точатся на внутришлифовальном станке типа Studer S131 [32]. Торец корпуса доводится на чугунной плите с помощью карусельного привода. Основная сложность в

технологическом процессе — это выдержка перпендикулярности к направляющей иглы, так как в процессе эксплуатации возможен преждевременный износ сопряжений и заклинивание иглы.

Направляющая корпуса распылителя хонингуется на станке типа Kadia 3LN2/25R [29]. После каждой операции хонингования производится промер диаметра направляющей и, как результат, обеспечивается требуемый зазор.

Распыляющие отверстия диаметром до 0,26 мм прожигаются с помощью электроэрозионной обработки, а диаметром более сверлятся. Данная операция осуществляется на станке Posalux Microfor HP4-EDM [210]. Большое количество распыляющих отверстий ограничивает ресурс распылителя.

После этого распыляющие отверстия подлежат контролю расхода топлива (л/мин), показания сверяются с регламентными данными и корректируются. Расходомер должен иметь погрешность измерений 1% от номинальных значений, а при 10% номинала погрешность расхода должна составлять не более 5%.

После изготовления деталей их комплектуют и доводят притирочной операцией. Плоскостность торца корпуса распылителя к прямолинейности направляющей должна быть перпендикулярна и выдерживается до 1 мкм. Округлость запирающего конуса перпендикулярна к торцу форсунки, при этом конусность должна отсутствовать. Эти параметры проверяются лабораторией с помощью угломеров и кругломеров. Шероховатость получаемых поверхностей Ra0,1...0,05 при точности измерительного оборудования 0,05 мкм [59, 192].

Минимальный допуск прецизионного сопряжения иглы и корпуса распылителя должен быть не менее 2 мкм, так как меньший зазор приводит к зависанию иглы. Технологический допуск лежит в интервале от 2...4 мкм, а размеры изготовленных деталей распределяются по нормальному закону распределения. Такой интервал обеспечивает получение партии распылителей до 10 тыс., единиц. Размеры изготовленных деталей несколько отличаются друг от друга.

Иглы распылителей изготавливаются из инструментальных сталей P18, P6M5 и в редких случаях 9ХС. В производстве игл распылителей используют

объёмную закалку и многократный отпуск для получения мелкозернистой структуры и максимальной поверхностной твёрдости стали 63...65 HRC. Микротвёрдость иглы 7850 МПа [162, 163].

Корпус распылителя изготавливают из конструкционных легированных высококачественных сталей 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА и 40ХН2МА с последующей химико-термической обработкой (ХТО) – цементацией, которая характеризуется нагревом деталей и выдержкой их в среде ацетилена. Твёрдость поверхности стали после упрочнения составляет 60...62 HRC. Микротвёрдость корпуса распылителя после термической обработки 7350 МПа [20, 62, 127, 156, 162, 163, 244].

Восстановление распылителей экономически целесообразно, так как затраты на изготовление запасных частей составляют до 70% в себестоимости ремонта техники. Себестоимость восстановленных деталей ниже на 25...45% от стоимости новых [146, 154]. Восстановить работоспособность распылителей форсунок возможно с помощью приращения геометрических размеров деталей до номинальных значений на изношенных участках. Существующие технологии восстановления и упрочнения приводят к изменению механических свойств деталей.

Главным требованием при восстановлении распылителей форсунок является обеспечение высоких физико-механических свойств деталей, которые являются наиважнейшими характеристиками, ответственными за их работоспособность, долговечность и износостойкость [35, 75, 224].

Максимальная твёрдость деталей достигается применением термической и химико-термической обработки. После высокотемпературного воздействия в структуре металла возникают остаточные напряжения, часть которых снимается с помощью отпуска. Кристаллическая решётка в применяемых сталях не является идеально правильной. Металлы состоят из зёрен, а границы зёрен сами по себе являются нарушением кристаллического строения. Зёрна отличаются друг от друга формой, размерами и взаимным расположением атомных плоскостей. При нагревании металлов амплитуда тепловых колебаний атомов в кристаллической решётке возрастает, что приводит к их диффузионной подвижности и увеличению

размеров зёрен. В целях достижения равновесного состояния атомы металла стремятся расположиться в узлах кристаллической решётки. Эти процессы протекают тем интенсивнее и полнее, чем выше температура и продолжительность нагрева [34, 35, 188, 202].

При температурах нагрева сталей, применяемых при изготовлении распылителей, свыше низкого отпуска 180...400 °С и других в зависимости от химического состава, происходят структурные изменения зерна металла, которые приводят к уменьшению плотности дислокаций и образованию субграниц [35, 162, 163]. В результате снижается прочность и повышается пластичность металла. Изменяются механические свойства.

При высокотемпературном нагреве металлов уменьшается твёрдость деталей из-за увеличения объёма зерна. Нагрев сталей при температурах 600...727 °С ведёт к образованию новых зёрен путём их зарождения в наиболее напряжённых зонах стали – рекристаллизация. При дальнейшем повышении температуры нагрева от 727°С до линии солидус активизируется рост величины зерна, несколько зёрен объединяются в одно. В результате изменяются механические свойства металлов. Металл деталей становится более хрупким [34, 83, 141, 202].

После формирования упрочняющего покрытия на поверхностях иглы и корпуса распылителя форсунки при использовании высокотемпературных технологий, температура которых равна низкому отпуску и выше, происходит отпуск сердцевины деталей, что требует последующей закалки, в результате которой осуществляется релаксация внутренних напряжений [87, 188, 224].

Зависимость изменения твёрдости применяемых марок сталей при изготовлении распылителей форсунок от температуры их нагрева представлена на рисунке 1.3 [162, 163]. Согласно данным, увеличение температуры нагрева деталей распылителя приводит к снижению их твёрдости и релаксации внутренних напряжений.

Исходя из выше изложенного, для сохранения физико-механических свойств иглы и корпуса распылителя форсунки и исключения их повторной закалки температура осаждения карбидохромового покрытия не должна превышать

уровень низкого отпуска деталей 180...200°C. Это позволит применять разработанную технологию ко всем видам распылителей форсунок, детали которых изготовлены из рассмотренных марок сталей, а также и тех, где температура низкого отпуска соответствует не выше указанного предела.

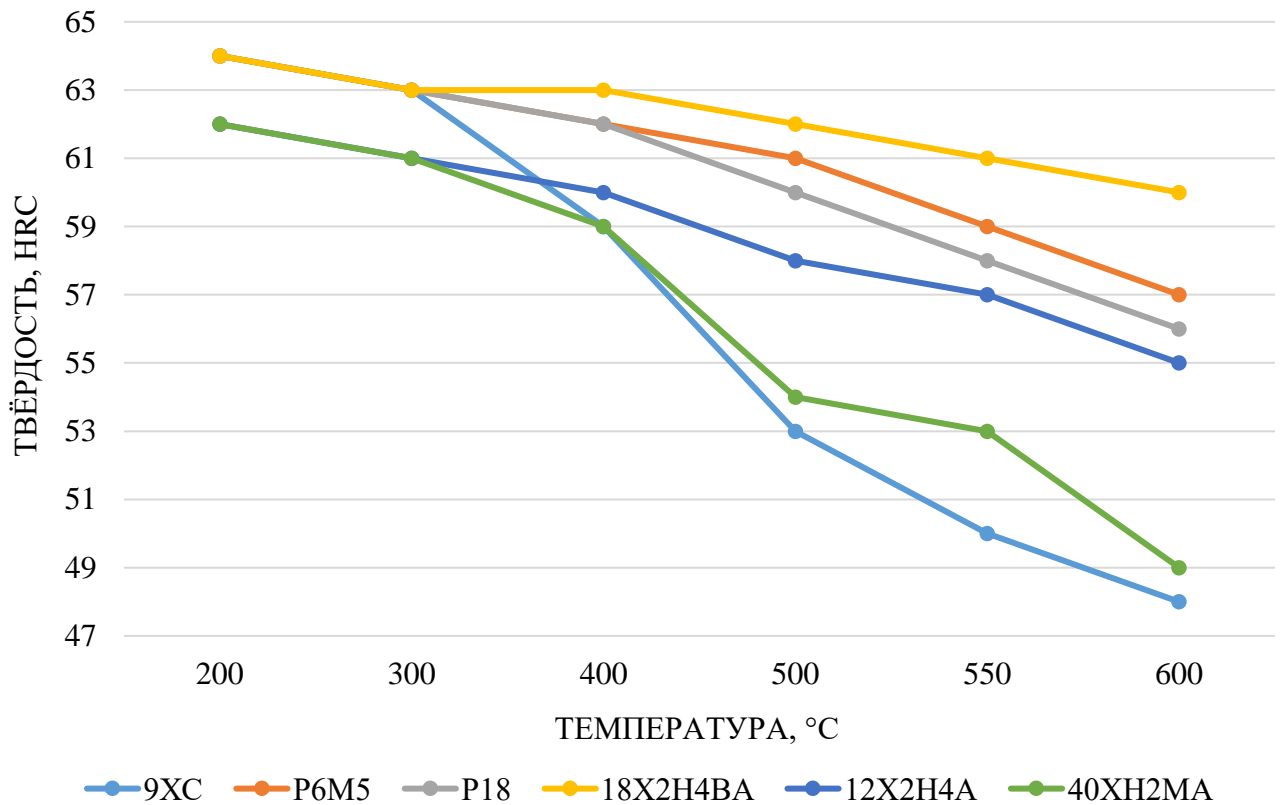


Рисунок 1.3 – Характеристика изменения твердости сталей в зависимости от температуры отпуска.

Таким образом, для сохранения твердости на уровне 62...64 HRC оптимальная температура нового способа восстановления деталей распылителя форсунки не должна превышать 180...200°C.

1.3. Анализ износа деталей распылителя форсунки

Вопросами изнашивания трущихся поверхностей деталей при наличии в зоне контакта абразивных частиц посвящены работы известных учёных М.А. Бабичева, М.М. Хрущева, М.М. Тененбаума, И.В. Крагельского, Б.И. Костецкого, Д. Мооре, И. Ланкастера, Е.М. Морозова и другие.

Основная причина износа прецизионных пар в топливной системе связана с качеством топлива. Согласно межгосударственным стандартам ГОСТ 305 и ГОСТ 6370 [61, 65], массовая доля механических примесей в топливе должна составлять не более 0,005% включительно, и это оценивается как их отсутствие. По данным [85, 86, 87 89, 98, 147, 206, 230] содержание механических примесей в топливе увеличивается на этапах от нефтеперерабатывающего завода до топливного бака машины с 0,0005 до 0,063 %, т. е. в 126 раз.

Машинно-тракторные агрегаты перемещаются по большим земельным площадям и работают в пылевом облаке, которое содержит твёрдые абразивные частицы. Установлено, что через сапун в топливный бак трактора поступает до 0,3 м³ воздуха в час. При пахоте степень насыщения воздуха пылью составляет 0,05...1,2, при севе - 0,8...2,5 и при транспортных работах доходит до 2,1 г/м³. Установлена концентрация абразивных частиц в баке с топливом при пахоте 30 г/т или 0,0255 г/литр при плотности дизельного топлива 850 кг/м³. В таблице 1.2 представлена характеристика минералогического состава пыли, исследованной в Московской области [86, 168, 230, 234].

Таблица 1.2 – Минералогический состав образцов пыли в Московской области.

Компонент	Минерал	Содержание, %	Микротвёрдость, МПа
Оксид кремния	Кварц	78	10 500 – 11 300
Оксид алюминия	Корунд	10	21 000 – 24 000
Оксид железа	Гематит	10	8 500 – 9 500
Оксид магния	Периклаз	1	9 080 – 11 250
Оксид кальция	Известь	1	5 800 – 6 500

Микротвёрдость кварцевого абразива превышает микротвёрдость рабочих поверхностей деталей в 1,4 раза, а у оксида алюминия превышение в 2,7 раза.

Для защиты узлов и деталей топливной аппаратуры машин от загрязнений применяются различного рода уплотнения, но они также несовершенны [167]. Согласно данным РОССТАТа доля отказов, происходящих по причине потери плотности соединений, составляет 17,4% [86, 124, 198]. Потеря герметичности

приводит к проникновению пыли в подвижные соединения трущихся и сопряжённых деталей.

При нарушении технологии ремонта и обслуживания топливной системы возможно попадание в неё крупных абразивных частиц и химически активных веществ, что также разрушает детали топливной аппаратуры (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Характеристика загрязняющих веществ, приводящая к изнашиванию прецизионных поверхностей.

Коррозионное (химическое) изнашивание деталей ТА дизелей вызывается главным образом наличием в топливе серы и воды. В соответствии с ГОСТ 305-82 наличие воды в топливе не должно превышать 0,03 % по массе, 300 г/т. Основные причины попадания воды в топливную систему дизеля – нарушение условий транспортировки, хранения, заправки, конденсации влаги из воздуха на стенках топливных баков. Водная эмульсия, растворенная в топливе, органические соединения и газы резко увеличивают скорость коррозии металлов.

Кислотность дизельного топлива во многом определяет наработку топливной аппаратуры. С увеличением кислотности дизельного топлива не только увеличивается его коррозионная агрессивность, но и повышается износ двигателя, так как топливо в системе будет оказывать электролитическое влияние на отдельные элементы системы. Согласно ГОСТ 305, содержание водорастворимых кислот и щелочей в топливе недопустимо [61]. Химические активные вещества совместно с абразивными частицами приводят к более интенсивному изнашиванию, вызывая коррозионно-механическое изнашивание.

Повысить коррозионную стойкость деталей распылителя и снизить нагарообразование возможно с помощью нанесения на поверхности деталей защитной плёнки, которая будет инертна к минеральным и органическим растворителям, а также будет обладать низкой шероховатостью и иметь отталкивающие свойства для обеспечения смыва продуктов горения топлива.

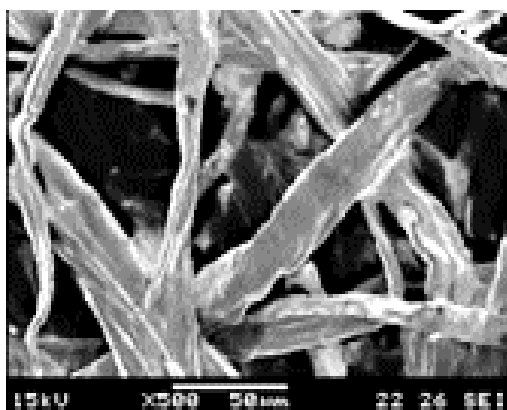
Количество содержащегося абразива в топливе влияет на наработку ТА. Фильтра тонкой очистки способны задерживать загрязняющие вещества размером до 3х мкм и имеют степень очистки 85...98% (таблица 1.3) [70, 237]. При эксплуатации происходит закупоривание фильтрующих элементов этими частицами, а при использовании свыше регламентированной наработки могут приводить к повреждению фильтрующих элементов, с последующим прохождением в систему более крупных абразивных частиц.

Таблица 1.3 – Концентрация абразивных частиц в топливе после очистки.

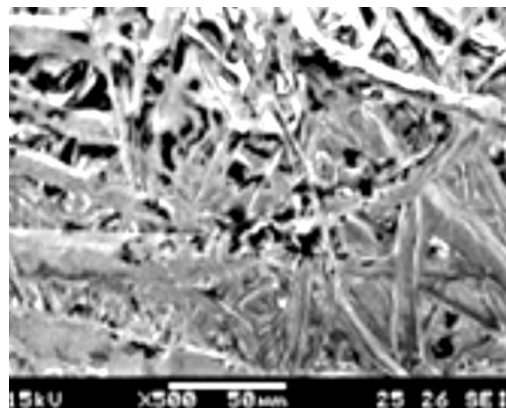
Наименование	до очистки	после очистки			
	100%	2%	5%	10%	15%
Оксид кремния	78%	1,56%	3,90%	7,80%	11,70%
Оксид алюминия	10%	0,20%	0,50%	1,00%	1,50%
Оксид железа	10%	0,20%	0,50%	1,00%	1,50%
Окись магния	1%	0,02%	0,05%	0,10%	0,15%
Окись кальция	1%	0,02%	0,05%	0,10%	0,15%

Абразив имеет различную геометрическую форму, включая сферическую, овалоидную, конусную и т.д. [182]. Поступает в распылитель форсунки с потоком топлива.

Использование низкокачественных фильтров приводит к преждевременному износу топливной аппаратуры. На рисунке 1.5 показан вид фильтрующей среды топливного фильтра при увеличении в 500 раз. Следует отметить, что все низкокачественные фильтры (контрафактные) имеют более крупную структуру пор, чем высококачественные (оригинальные). Механические примеси, содержащиеся в топливе при использовании неоригинальных фильтров, попадают в систему и вызывают ускоренный износ деталей. Массовое использование первых фильтров объясняется тем, что они имеют стоимость значительно ниже, чем вторые [251]. Такая разница цены объясняется тем, что при их производстве не соблюдаются технологии изготовления и используются некачественные материалы. Применение этих фильтров нередко приводит к замене ТНВД, форсунок и распылителей. В условиях экономических санкций это может привести к долгосрочному простоя машины.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Изображение фильтрующего элемента в разрезе при увеличении в 500 раз:

а – низкокачественный фильтр (неоригинальный или контрафактный);

б – высококачественный фильтр (оригинальный).

По результатам обследования фильтров тонкой очистки (ФТО) топлива тракторов в работе [86] установлено, что более 35% из них теряют работоспособность в условиях эксплуатации на обводненном топливе. В рядовой эксплуатации 10...18 % элементов ФТО набухают и деформируются. Фильтры быстрее забиваются механическими примесями, что приводит к увеличению размера пор и пропуску большего числа абразивных частиц.

Таким образом, дизельное топливо является гетерогенной смесью, а износ распылителей форсунок в процессе эксплуатации является естественным явлением.

Распылители форсунок автотракторных дизелей подвержены внезапным и постепенным отказам. Внезапные отказы характеризуются нарушением подвижности иглы, вызванными изнашиванием рабочих поверхностей и уменьшением зазора между направляющими поверхностями корпуса и иглы. Последнее осуществляется в связи с проникновением горячих отработанных газов из камеры сгорания двигателя вовнутрь корпуса распылителя, что создает благоприятные условия для осмоления рабочих поверхностей сопряжения и отложения на нём кокса, который увеличивает коэффициент трения. Удалить образовавшийся нагар возможно путём применения очистителей топливной системы двигателя [11, 12, 77].

К постепенным отказам следует отнести абразивное, эрозионно-кавитационное, коррозионно-механическое, усталостное и другие процессы, приводящие к ухудшению качества распыливания топлива. В процессе работы форсунки изнашиваются сопрягаемые поверхности иглы и корпуса распылителя. Вследствие износа направляющей иглы и корпуса уменьшается плотность пары и увеличивается утечка топлива в дренажное отверстие корпуса форсунки. Достижение максимального предела износа распылителей форсунок приводит к простоям машины.

На рисунке 1.6 представлен внешний вид с дефектами изношенных деталей распылителей форсунок [146].

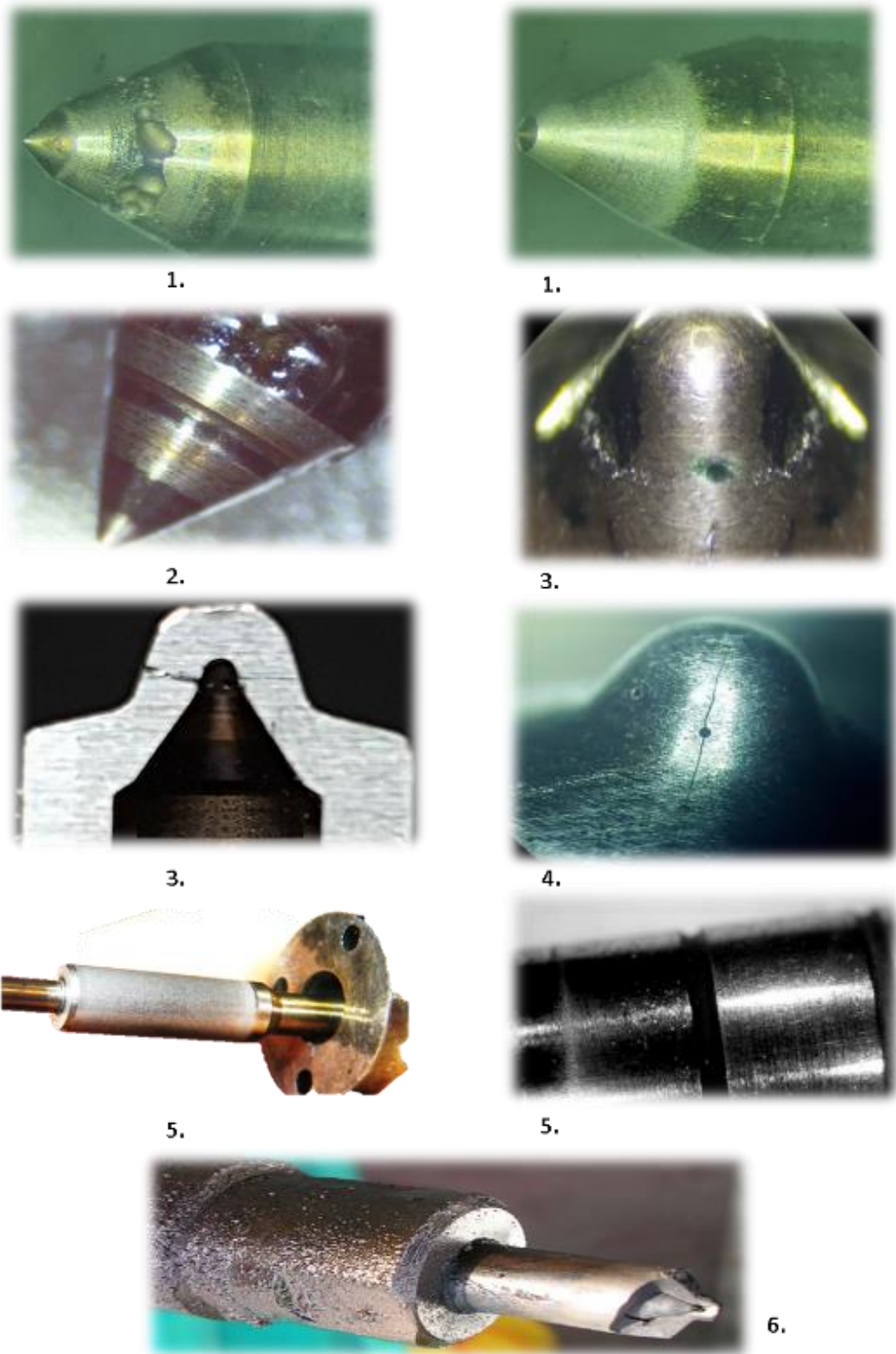


Рисунок 1.6 – Внешний вид и дефекты изношенных деталей распылителей форсунок:

1 – Эрозия запорного конуса; 2 – Износ запорного конуса по уплотняющему пояску; 3 – Износ распыляющих отверстий; 4 – Трещина на носике распылителя; 5 – Задиры на направляющей; 6 – Откол носика распылителя.

Места износа иглы и корпуса распылителя (рисунок 1.7) следующие: внешние поверхности – торец иглы *1* и торец корпуса распылителя *2* и внутренние поверхности – направляющая поверхность *А*, запирающий конус *Б* и распыляющие отверстия *В*.

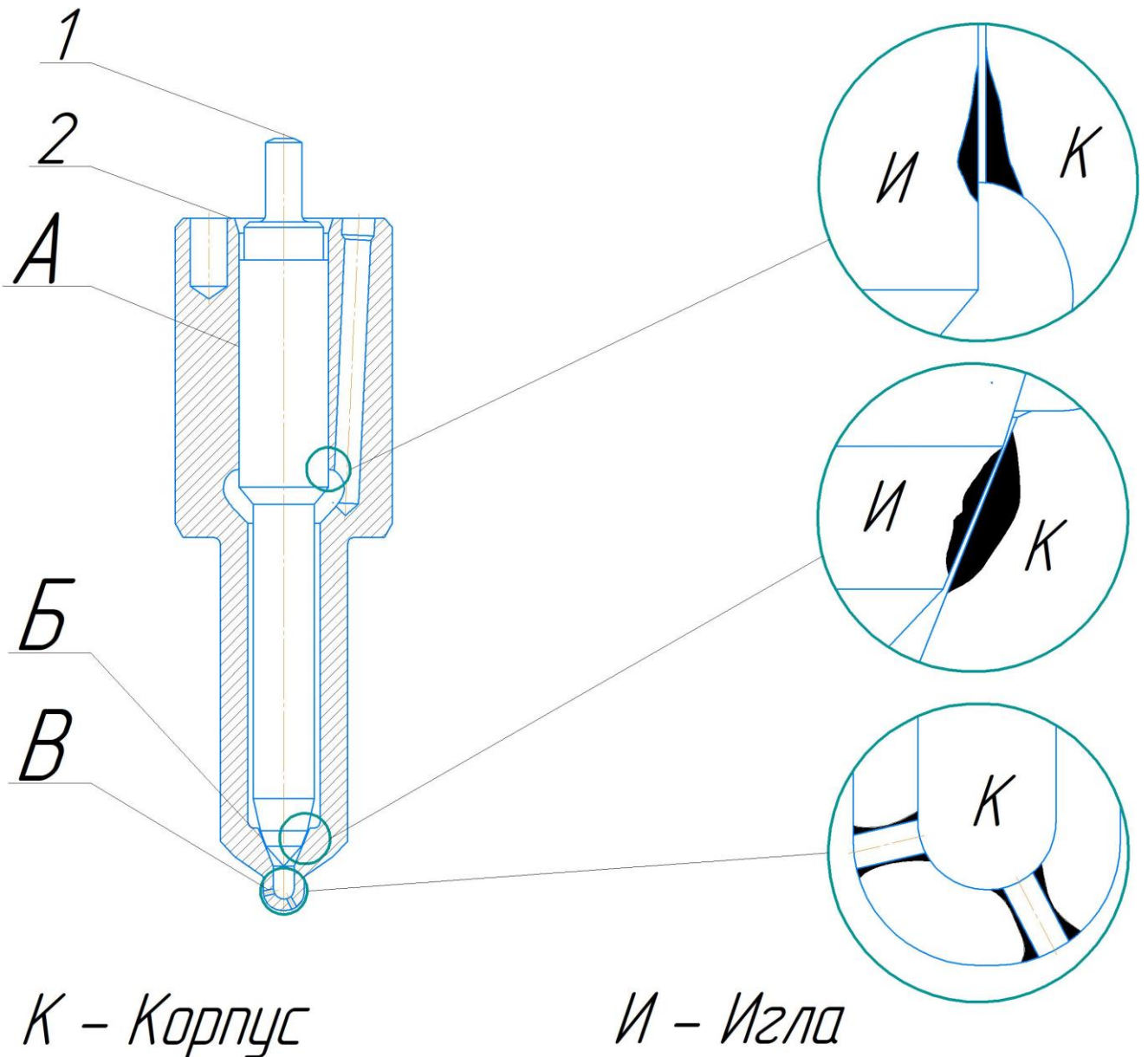


Рисунок 1.7 – Дефекты (износ) иглы и корпуса распылителя [20]:

1 – торец иглы; 2 – торец корпуса распылителя;

А – направляющая поверхность; Б – запирающий конус;

В – распыляющие отверстия.

Торец иглы распылителя 1 (рисунок 1.7) сопрягается со штоком форсунки и удерживает её в закрытом положении пружиной. При нагнетании достаточного давления топлива во внутренней полости корпуса распылителя игла преодолевает силу сжатия пружины и открывает подачу топлива, идущую через распыляющие отверстия, в ЦПГ дизеля. В результате многоцикловых динамических нагрузок осуществляется его истирание. Компенсация уменьшения длины иглы распылителя обеспечивается за счёт подбора регулировочных шайб.

Торец корпуса распылителя 2 сопрягается с корпусом форсунки. В момент установки распылителя в форсунку и её дальнейшего монтажа в головку блока цилиндра (ГБЦ), а также в процессе эксплуатации, при которой осуществляется температурное расширение сталей, применяемых для изготовления деталей распылителя и форсунки, возникают деформации рабочих поверхностей распылителя, которые приводят к нарушению плоскости торца 2 и прямолинейности направляющей А. В результате этого деформация направляющей распылителя может достигнуть 3...5 мкм, а искривление оси корпуса распылителя 5...25 мкм.

Основными мероприятиями, уменьшающими деформацию корпуса распылителя, являются снижение жёсткости гайки для компенсации неточностей изготовления и ужесточение допуска на неперпендикулярность опорного торца гайки к оси резьбы, а также исключение контакта гайки с корпусом распылителя по галтели в месте перехода носика корпуса в утолщенную часть корпуса распылителя и перекосов форсунки при креплении в канале головки двигателя.

Таким образом, торец иглы истирается в результате многоцикловых динамических нагрузок, возникающих при завершении подачи топлива в ЦПГ. Торец корпуса форсунки не изнашивается, но влияет на износ направляющей и запорного конуса распылителя.

Направляющая поверхность иглы и корпуса распылителя подвергается коррозионно-механическому изнашиванию (рисунок 1.7.А). Наличие в топливе химически активных веществ приводит к коррозии поверхностей направляющей. Нахождение абразива в топливе в виде мелкодисперсных частиц и попадание их в

сопряжение деталей между корпусом и иглой распылителя форсунки вызывает как пластическую деформацию, так и микрорезание металла [84, 138, 181, 240, 244]. Об этом свидетельствуют продольные риски на игле и корпусе распылителя (рисунок 1.6.5). Результатом износа является истирание цилиндрической поверхности прецизионного сопряжения иглы с корпусом распылителя до приобретения конической формы, ориентированной в сторону запорного конуса.

На рисунке 1.8 показана динамика движения абразивной частицы в потоке топлива, который характеризуется давлением, температурой и скоростью, и заклинивание её в направляющей распылителя форсунки в момент увеличения давления топлива перед впрыском его в ЦПГ.

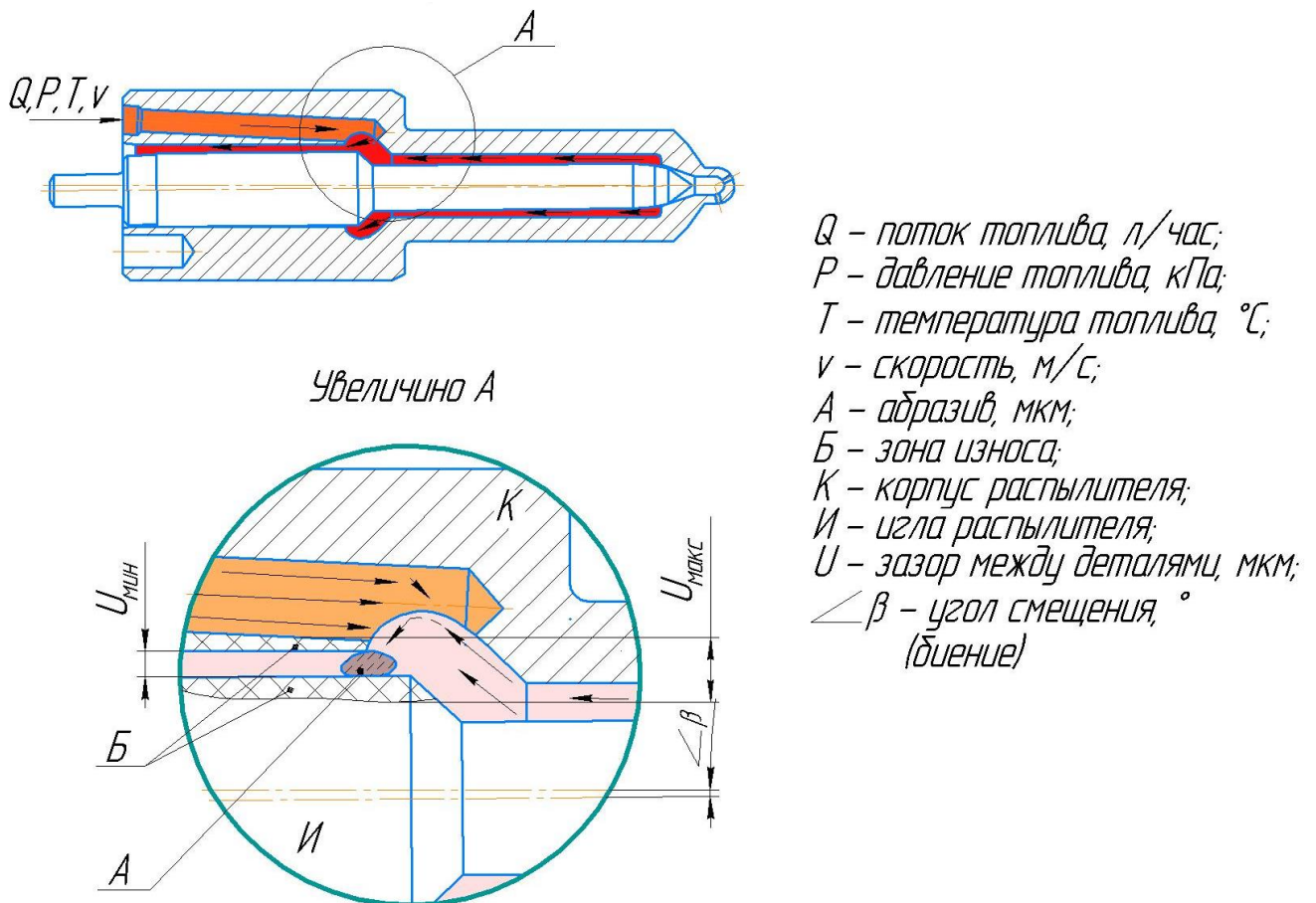


Рисунок 1.8 – Движение абразива в распылителе форсунки ДВС.

В момент подачи топлива в ЦПГ дизеля игла совершает поступательное движение относительно корпуса распылителя. Абразивная частица, находящаяся в

зазоре между деталями, либо внедряется в металл и осуществляет его микрорезание, либо разрушается на более мелкие части, которые впоследствии попадают в более узкий зазор соединения за счёт потока топлива. Оставшаяся часть абразива осуществляет аналогичные действия до полного разрушения частиц или вымывания их в камеру сгорания. С увеличением зазора направляющей в прецизионное сопряжение попадают абразивные частицы большего диаметра и количества, что вызывает наиболее интенсивный износ поверхностей, так как с увеличением размера и количества частиц требуется большая сила на их разрушение. Абразив размером, равный средней высоте микронеровностей поверхности, не вызывает износа [215].

В результате изнашивания направляющей распылителя форсунки снижается гидроплотность распылителя [20, 147, 206]. Установлено, что с увеличением диаметрального зазора в плунжерной паре впрыскивание топлива форсункой в цилиндры начинается позднее. При изменении зазора в плунжерной паре с 2 до 14 мкм мощность дизеля падает с 62 до 48,8 кВт (Д-245), а удельный расход топлива увеличивается на 3,4% [159].

К наиболее слабым местам распылителя форсунки относится запорный конус, поверхности которого изнашиваются неравномерно. Износ занимает примерно $\frac{2}{3}$ всей плоскости и выглядит в виде кольцевой канавки матового оттенка и эрозии с шириной пояса 0,2...0,25 мм (рисунок 1.6.1-2 и 1.7.Б). Развальцовка запорного конуса корпуса распылителя относительно оси иглы нарушается на 6...8°.

Износ торца *I* и запорного конуса распылителя *B* увеличивает высоту подъёма иглы на 0,16...0,37 мм при наработке до 4000 мото-ч. Предельная высота подъёма иглы доходит до 0,7 мм с учётом износа торца иглы распылителя *I* против номинальной 0,23...0,33 мм. В связи с этим по мере увеличения износа увеличивается скорость опускания иглы, что приводит к более интенсивному изнашиванию запорной части распылителя [7, 8, 20, 22].

Изнашивание запорного конуса происходит из-за многоцикловых динамических нагрузок, в результате которых металл деталей претерпевает наклёп,

что приводит к его усталости и шелушению микрообъёмов. В момент подачи топлива, в котором содержатся абразивные частицы и химически активные вещества, в камеру сгорания двигателя осуществляется вымывание частиц металла деталей распылителя, что характеризуется гидроабразивным изнашиванием.

В момент от начала опускания иглы и до полного перекрывания потока топлива, подаваемого в ЦПГ, уменьшается дросселирующая щель, увеличивается скорость движения топлива, а вместе с ней и скорость абразива. При касательном контакте абразива с запорным конусом на его поверхности образуются риски и бороздки, а при динамическом упруго-контактном взаимодействии осуществляется дробление абразива. В зависимости от природы абразивной частицы, она либо разрушается, либо внедряется в поверхность деталей.

На износ запирающего конуса в большей степени влияет увеличение зазора сопряжения направляющей поверхности, от которой зависит увеличение угла биения (смещения) иглы, так как посредством завершения каждого цикла впрыска топлива игла своим конусом разбивает запирающий конус корпуса распылителя.

Нарушение плотности сопряжения приводит к подтеканию топлива в камеру сгорания. Крупные капли не успевают сгореть и образуют кокс и нагар на деталях распылителя, поршне и компрессионных кольцах, что обуславливает нагарообразование. Кроме этого, запорный конус омывается горячими газами камеры сгорания, где при наличии активных кислот процесс коррозии протекает более интенсивно, и поверхность конуса сильно разрушается. Недостаточная плотность прилегания запорного конуса позволяет газам из камеры сгорания прорываться вовнутрь распылителя, вызывая зависание иглы в направляющей. При работе двигателя этот дефект проявляется чёрным выхлопом, увеличенным расходом топлива и снижением мощности двигателя [20, 22, 23, 30, 82, 124, 156, 159, 160, 215].

Кавитационное изнашивание образует на поверхностях запорного конуса эрозию в виде небольших углублений или кратеров различных размеров. Механизм разрушения поверхности следующий: первоначально осуществляется ускоренное

разрыхление металла, приводящее к образованию множественных микротрещин, а затем выкрашивание мелких его частиц [199].

Кавитация возникает при завершении подачи топлива распылителем в момент перекрытия иглой его потока. Поток топлива перенаправляется в обратную сторону, при обтекании запорного конуса образует зону с низким давлением, которая приводит к образованию каверны (кавитационных пузырьков), которые заполняются насыщенным паром топлива и располагаются на его поверхности. При нормализации давления топлива каверна захлопывается, подвергаясь сильному адиабатическому сжатию. В момент схлопывания давление и температура пара локально могут достичь значительных величин (по расчётным данным до 100 МПа и до 10000 К соответственно). После схлопывания каверны в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве [40, 81, 106]. Эффект кавитации на запорном конусе наблюдается и при начале цикла впрыска топлива в камеру сгорания и распространяется на распыляющие отверстия.

Кавитационное воздействие снижает вязкость дизельного топлива, в результате которого увеличивается температура вспышки и происходит его детонация из-за деструкции молекул, которая вызывается микрокрекингом и процессами ионизации. В результате этого в системе накапливаются «активированные» частицы: радикалы, ионы, ионно-радикальные образования. Энергия диссоциации связи С–Н колеблется в зависимости от молекулярной массы и структуры молекулы в пределах 322...435 кДж/моль, энергия диссоциации связи С–С – 250...348 кДж/моль. При разрыве связи С–Н от углеводородной молекулы отрывается водород, при разрыве связи С–С углеводородная молекула разрывается на две неравные части [31, 179, 190, 191, 243].

Таким образом, в результате износа запорного конуса проседает игла и ухудшается герметичность сопряжения. Износ напоминает кольцевую впадину незначительной глубины, размещенной в середине образующей поверхности конуса. Значительный износ запорной части может приводить к прорыву газов из ЦПГ вовнутрь распылителя.

Работоспособность распылителей форсунок во многом определяется состоянием распыляющих отверстий. На кромках распыляющих отверстий осуществляется гидроабразивный и кавитационный износ, который сопровождается неравномерным изнашиванием. Изменение геометрии внутри сопла сопровождается нарушением цилиндрической формы, увеличением диаметра отверстий и шероховатости их стенок, а также закруглением кромок (рисунок 1.6.3 и 1.7.В), что приводит к увеличению пропускной способности форсунки, снижению давления и сокращению продолжительности и качества впрыска топлива в цилиндр. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в первые 50...200 часов работы распылителя.

Закругление кромок распыляющих отверстий на выходе из корпуса распылителя осуществляется в результате внезапного расширения потока топлива. Поток срывается с кромки и расширяется не внезапно, как русло, а постепенно, образуя вихреобразования, которые являются причиной износа. В условиях наличия в топливе загрязняющих веществ увеличивается интенсивность изнашивания. Аналогичный процесс осуществляется и на входе в распыляющие отверстия, но с противоположным действием за счёт внезапного сужения потока топлива. В гидротехнике это положение часто называют теоремой Борда – Карно [40].

В результате этого ухудшается шероховатость поверхности распыляющих отверстий, что влияет на гидравлические характеристики распылителя. Значение критической высоты микронеровностей может быть $Ra_{0,8}$ [20, 243].

При продолжительной эксплуатации и по мере изнашивания распылителя распыляющие отверстия закоксовываются. Это происходит в результате воздействия высоких температур и физико-химических процессов, вызванных недостатком кислорода в ЦПГ. Интенсивность нагарообразования зависит от следующих факторов: проникновение продуктов сгорания в корпус распылителя, химический состав топлива, дополнительное подвпрыскивание дизельного топлива в камеру сгорания и снижение давления начала впрыскивания. Из-за нагарообразования уменьшается эффективное проходное сечение распылителя,

вследствие этого в камеру сгорания двигателя подаётся меньший объём топлива, что нарушает равномерность подачи по цилиндрам, и, как следствие, снижаются технико-экономические показатели дизеля. Уменьшение эффективного проходного сечения распыляющих отверстий из-за закоксовывания на 20..25% приводит к снижению мощности двигателя на 6,5...8,0% [20, 22, 127, 156, 159, 160].

Интенсивность разрушения от кавитации может быть снижена путём использования материалов и технологий, направленных на снижение воздействия изнашивания деталей. Решением немецкой компании *Fisher Scientific* по производству гидравлических насосов было использование подходящих деталей. Американская компания *Emerson Electric*, занимающаяся разработкой систем управления технологическими процессами (клапаны и аналитические приборы), предлагает решение по использованию более твёрдых материалов. Все предлагаемые способы позволяют защитить детали от кавитации, а, следовательно, формирование на распыляющих отверстиях распылителя форсунки плотного износостойкого покрытия, у которого межмолекулярная связь молекул короче, чем у металла деталей распылителя, позволит снизить воздействие разрушающего эффекта от кавитации и гидроабразивного изнашивания, что обеспечит надёжность распылителей.

Таким образом, проведённый анализ свидетельствует о возможности увеличения надёжности распыляющих отверстий распылителя форсунки с помощью осаждения на их стенках плотного и износостойкого покрытия, которое позволит снизить воздействие разрушающего эффекта от кавитации и гидроабразивного изнашивания.

Проведённый анализ свидетельствует, что износы направляющих иглы и корпуса распылителя влияют на утечку топлива и остаточное давление в нагнетательной полости, запирающих конусов – на давление начала и конца впрыскивания, а распыляющих отверстий на качество его распыла. В таблице 1.4 рассмотрены дефекты распылителя, влияющие на надёжность форсунки [20].

В таблице 1.5 представлены величины износа и вероятности отказа по изнашиваемым частям распылителя форсунок типа ФД-22 в зависимости от

наработки. Износ торца иглы влияет на её высоту подъёма, что ухудшает качество распыла топлива. Торце корпуса форсунки не изнашивается, но влияет на износ направляющей и запорного конуса распылителя. Увеличение зазора направляющей части распылителя влияет на износ запорного конуса, так как увеличивается его пятно контакта. Увеличение диаметра распыляющего отверстия приводит к увеличению количества подаваемого объёма топлива в цилиндр двигателя, что влияет на технико-экономические параметры работы машины [147, 206].

Таблица 1.4 – Влияние дефектов распылителя на работоспособность форсунки [20].

Наименование дефекта	Параметры работоспособности ГОСТ 10579						
	Давление начала выпрыска	Герметичность по запирающим конусам	Подвижность иглы	Качество распыла топлива	Отсутствие течи в месте уплотнений	Пропускающая способность	Гидравлическая плотность
1. Износ и закоксовывание отверстий	+	+	±	+	-	+	-
2. Износ и биение конусов	+	+	-	+	-	+	+
3. Износ направляющих	±	-	-	±	-	-	+
4. Заклинивание иглы	+	+	+	+	-	+	+
5. Износ упорной поверхности иглы	+	-	-	+	-	+	-
6. Износ торца хвостовика	+	-	-	+	-	-	-
7. Повреждение уплот. торца корпуса	-	-	-	-	+	+	+

+ влияет

- не влияет

± влияет косвенно

Таблица 1.5 – Износы распылителя форсунки.

Сопряжения распылителя	Износ, U, мкм		Вероятность отказа, P, %	
	min	max	500 МОТО-Ч	4000 МОТО-Ч
Торец хвостовика иглы	1	5	3	8
Торец корпуса распылителя	-	-	-	-
Направляющая	20	70	39	88
Запорный конус	5	20	23	36
Распыляющие отверстия	29	78	48	89

К восстановлению прецизионных деталей распылителей форсунок пригодны до 90% ремфонда, а остальные 10% выбраковываются по причине невозможности восстановления [20, 146].

Таким образом, нарушение работоспособности распылителей форсунок связано с воздействием на них разнообразных факторов, приводящих к износу, деформациям, коррозии или другим видам повреждения рабочих поверхностей сопрягаемых деталей, которые приводят к снижению мощности двигателя и увеличению расхода топлива. В целях повышения надёжности распылителя необходимо снижать интенсивность износа деталей путём увеличения их физико-механических свойств или улучшения качества очистки топлива.

Нарушение работоспособности распылителей форсунок сопровождается токсичностью отработанных газов. Изучению влияния токсичности выхлопных газов на окружающую среду посвящены работы [93, 144, 160, 208, 217, 243] и других учёных. Основным токсичным компонентом отработавших газов дизелей являются оксиды азота NO_x , доля которых в суммарных токсичных выбросах составляет 30 - 80% по массе и 60 – 95% по эквивалентной токсичности. Оксиды азота образуются при высоких температурах в камере сгорания вследствие окисления азота воздуха. Наиболее интенсивно окисление азота происходит в начальном периоде процесса сгорания до момента достижения максимальной температуры рабочего цикла.

Содержание монооксида углерода CO в отработавших газах дизелей характеризуется концентрацией, не превышающей 0,4 – 0,5%. В камере сгорания дизеля CO образуется из-за неравномерного распределения топлива в зоне горения, что приводит к возникновению зон с низким коэффициентом избытка воздуха, где наблюдается недогорание топлива. Другим источником образования CO являются высокотемпературные зоны топливного факела, в которых химическое равновесие смещено в сторону диссоциации диоксида углерода CO_2 с образованием CO и O_2 [217].

Лёгкие газообразные углеводы C_nH_m образуются при термическом распаде топлива в ядре и переднем фронте факела, в топливной плёнке на стенках камеры

сгорания и в результате подпрыскивания топлива. Одна из основных причин образования CH_x – наличие холодных пристеночных слоёв в камере сгорания. В процессе сгорания топлива пламя распространяется к стенке, от которой отводится теплота, и радикалы, образовавшиеся при горении, рекомбинируются на холодных стенках. В результате в пристеночных холодных слоях камеры сгорания остаются углеводородные частицы из нагретого и не до конца сгоревшего топлива. Другая причина образования CH_x – наличие в камере сгорания зон с малым коэффициентом избытка воздуха, в которых остаются несгоревшие углеводороды.

Одним из основных токсичных компонентов отработавших газов являются твёрдые частицы, которые состоят из растворимых и нерастворимых в органических растворителях фракций. Первые содержат несгоревшие частицы топлива и моторного масла. Нерастворимые составляющие твёрдых частиц – это сажа и сульфаты, которые образуются при сгорании содержащейся в топливе серы и оксидов металлов, добавляемых в топливо и масло в качестве присадок. Основной компонент твёрдых частиц в дизелях – сажа, которая состоит на 95 – 98% из углерода. Наличие сажи приводит к увеличению оптической плотности и появлению чёрного дыма в отработанных газах дизелей. Видимое дымление соответствует содержанию сажи более $0,1 \text{ г/м}^3$.

Сажа образуется и в результате термического разложения топлива при образовании активных углеводородных частиц в пламени. Содержание сажи в отработавших газах является результатом протекания двух процессов: образования и окисления сажи. Сажеобразование зависит от коэффициента избытка воздуха, особенностей смесеобразования, свойств топлива, температуры, продолжительности и своевременности сгорания. Повышенное содержание сажи в отработавших газах дизеля наблюдается на переходных режимах работы дизеля, а также на режимах с пониженной частотой вращения и полной нагрузкой, характеризующихся ухудшением распыливания топлива и недостатком воздуха [108, 131, 185].

Токсические свойства сажи обусловлены тем, что в ней присутствуют канцерогенные полициклические ароматические углеводороды. Эти углеводороды

образуются в камере сгорания в результате термического разложения тяжёлых фракций топлива в зонах с недостатком кислорода. В камере сгорания дизеля полициклические ароматические углеводороды адсорбируются на частицах сажи и удерживаются ими, либо переходят из топлива в отработавшие газы. Наиболее опасен среди них бензапирен.

Дымность двигателя определяется по ГОСТ 17.2.2.02 дымомером КИД-2, «Мета-01», «Смог-1М-01» и другими на разных частотах вращения коленчатого вала в течение 5...10 с. Измерения повторяют не менее 8 раз. Если дымность отработанных газов по результатам измерений выше нормы, то машина направляется на ремонт или на регулировку дизеля и его составляющих [52].

Определение содержания окиси углерода в кабине самоходной машины производят газоанализатором КИ-28066 «Газтестер», «Палладий-3» или аналогичным в зоне дыхания оператора на высоте 700...800 мм от точки отсчёта «0» сиденья при выполнении технологической операции. Перед началом измерений машина должна отработать не менее 1 часа при загрузке двигателя не менее 70% от номинальной. При взятии пробы в кабине необходимо провести не менее 5 измерений на содержание окиси углерода. Измерения проводят в соответствии с ОСТ 37.001.234. В соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.120 норма содержания окиси углерода в воздухе должна быть не более 20 мг/м³. В случае, если в кабине машины концентрация окиси углерода выше нормы, то необходимо провести техническое обслуживание по устранению повышенного содержания [116].

Таким образом, при неисправностях распылителей форсунок автотракторных дизелей, не только снижается мощность двигателя и растёт расход топлива, но и в окружающую среду с отработанными газами поступает большое количество токсичных и канцерогенных веществ, которые приводят к массовому загрязнению воздуха, почвы, воды и отравлению операторов эксплуатируемой техники, которое сопровождается быстрой утомляемостью и снижением производительности выполняемой работы.

1.4. Анализ решения проблемы износа

Вопросам развития технологии ремонта и создания новых способов повышения надёжности сельскохозяйственной техники, в том числе прецизионных деталей ТА дизелей посвящены работы Батищева А.Н., Богачёва А.Б., Бугаева В.Н., Бурумкулова Ф.Х., Воловика Е.Л., Галиновского А.Л., Голубева И.Г., Денисова В.А., Ерохина М.Н., Казанцева С.П., Козырева В.В., Кряжкова В.М., Лялякина В.П., Михлина В.М., Некрасова С.С., Мазаева Ю.В., Поляченко А.В., Пучина Е.А., Сергеева В.З., Черноиванова В.И., Чупятова Н.Н., Шаповалова С.Р., Юдина В.М. и других учёных.

Авторами работ [134, 173, 215, 225] исследованы виды изнашивания твёрдыми частицами, находящимися в свободном, полужакопленном и жакопленном состояниях. Доказано, что износостойкость поверхностей деталей зависит от соотношения их микротвёрдости и микротвёрдости абразива [22, 38, 61, 165, 181].

Установлено, что характер взаимодействия абразивной частицы с поверхностью детали изменяется от микрорезания до пластического передеформирования материала. Критерием оценки перехода от одного вида изнашивания к другому в этом случае, по работам [134, 173, 181], служит отношение глубины внедрения абразивной частицы в поверхность к её радиусу. Внедрившаяся частица способна вызвать микрорезание металла. При увеличении микротвёрдости материала воздействие абразивной частицы на поверхность принимает характер упругого оттеснения (контакта). При этом микрорезание на поверхности детали не наблюдается, а изнашивание происходит вследствие многоциклового усталости материала. Величина износа в этом случае в соизмеримых промежутках времени многократно уменьшается.

По данным исследований [27, 104, 118, 153, 225] для минимизации абразивного изнашивания поверхностная микротвёрдость материала должна быть не ниже 17 ГПа. По данным [215] износостойкость упрочнённой металлической поверхности резко возрастает при её значениях микротвёрдости, не превышающей 20% микротвёрдости абразива. Для обеспечения безотказной работы деталей при наличии в зоне контакта кварцевого абразива микротвёрдость их поверхности

должна составлять не менее 9 ГПа, а при наличии оксида алюминия не менее 16,8 ГПа [166].

На основании этих, и выше указанных, работ можно сделать вывод о необходимости комплексного подхода к решению вопроса повышения долговечности деталей распылителя форсунки, который должен включать инженерные, агрономические, технологические и конструкторские пути решения вопроса (рисунок 1.9) [86].

Наиболее перспективные пути решения — это инженерные и технологические направления, которые могут позволить получить заданную долговечность за счёт создания поверхностей с требуемыми физическими и механическими свойствами и максимально снизить значение внешних факторов на работоспособность агрегатов.

Проблема повышения надёжности прецизионных деталей топливной аппаратуры может решаться двумя путями. Первый — создание высокоэффективной системы очистки топлива от загрязняющих веществ, которые попадают в него на всех этапах транспортировки от нефтеперерабатывающего завода до топливного бака машины и при эксплуатации через сапун и уплотнительные соединения [167]. Второй — повышение физико-механических свойств рабочих поверхностей прецизионных деталей путём упрочнения до уровня, превышающего микротвёрдость абразивных частиц, содержащихся в топливе. Недостатком первого пути является невозможность полной очистки топлива фильтрующими элементами.

Таким образом, наиболее эффективными решениями повышения надёжности распылителей форсунок является совершенствование методов упрочнения деталей на стадии их изготовления и разработка упрочняющих технологий восстановления изношенных деталей. Упрочнение рабочих поверхностей деталей позволяет компенсировать несовершенство имеющихся в настоящее время уплотнений, соединений и систем фильтрации.

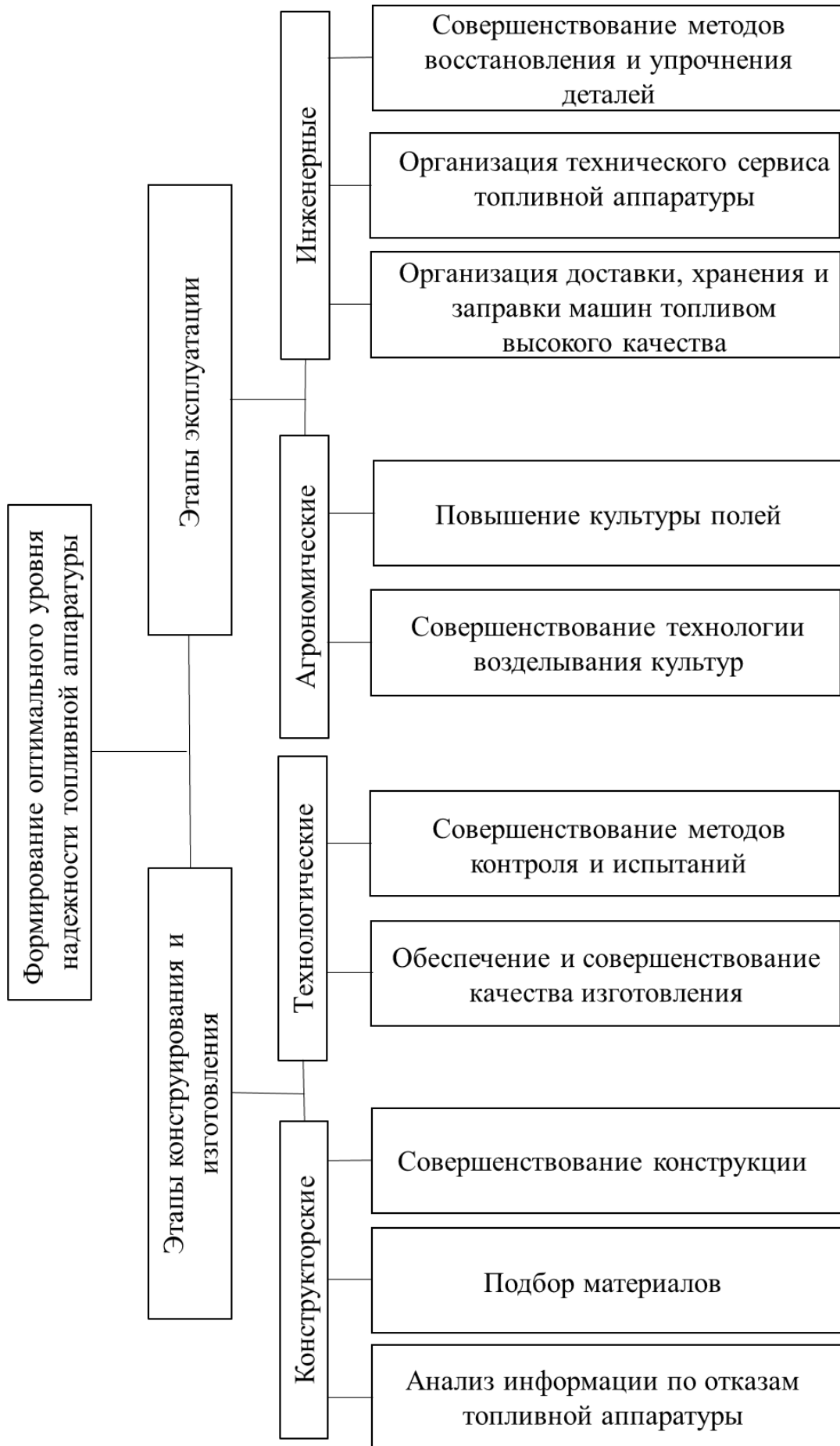


Рисунок 1.9 – Схема комплексного подхода в обеспечении необходимого уровня надёжности топливной аппаратуры.

1.5. Способы восстановления и упрочнения распылителей форсунок

Восстановление деталей выгодно, так как затраты на запасные части снижаются до 45% в случае восстановления собственными силами от стоимости новых и ресурсе равном новым, а при увеличенном в 1,5...2 раза до 23...30% [154].

В настоящее время широко применяется способ восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей, в том числе и плунжерных пар топливных насосов высокого давления, с помощью перекомплектовки. Данный метод является наиболее из ранних и заключается в очистке, дефектовке, выведении следов износа и селективной подборке прецизионных пар. Обеспечение герметичности запирающих конусов осуществляется путём совместной притирки иглы и корпуса. Способ позволяет восстанавливать не более 30% ремфонда распылителей. Кроме того, не решается проблема восстановления распыляющих отверстий. Однако эффективность данного способа крайне низкая, так как в первые сотни часов работы такие распылители вновь теряют герметичность [10, 146].

Известен способ, при котором детали распылителя пришедшие в ремонт после удаления следов износа комплектуются новыми. Преимуществом данного способа является то, что с корпуса распылителя можно убрать следы износа и под него изготовить новую иглу с необходимыми размерами и наоборот. Это позволяет сэкономить на ресурсах сырья, трудоёмкости изготовления единицы и затратах при производстве полностью новых распылителей. Данный способ может быть реализован только на заводах-изготовителях прецизионных деталей топливной аппаратуры [7, 8], так как механическая обработка иглы и корпуса должна производиться на оборудовании, применяемом при изготовлении новых распылителей.

Существует большое количество способов восстановления и упрочнения изношенных рабочих поверхностей деталей машин путём формирования на их участках износостойких покрытий. Применение того или иного способа зависит от условий эксплуатации и требований к получаемым покрытиям.

1.5.1. Диффузионная металлизация

В Институте механики и энергетике имени В.П. Горячкина разработаны технологические процессы восстановления прецизионных деталей топливной аппаратуры методами химико-термической обработки: борированием, титанированием, хромированием, хромотитанированием и другими.

Диффузионные покрытия на основе карбидов, нитридов, боридов железа и легирующих элементов отличаются высокой износо- и коррозионной стойкостью. При относительно небольшой толщине упрочняющего покрытия они могут быть рекомендованы для восстановления прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей.

При восстановлении плунжерных пар методом порошковой диффузионной металлизации карбидохромовыми, хромонитридными или железоборидными покрытиями для упрощения технологии и улучшения качества механической обработки предпочтительнее наносить покрытие на плунжер. Эта деталь имеет меньшие размеры и более доступные наружные поверхности. Отверстие втулки можно подвергать только механической обработке до выведения следов износа.

Автором работы [231] предложен способ восстановления распылителей диффузионным борированием в расплаве солей. В результате на поверхности стали образуются бориды железа и карбиды бора. Микротвёрдость сталей Р18 и 18Х2Н4ВА после борирования от 18,7...28 ГПа. Приращение размеров деталей до 20...30 мкм. Однако, боридные слои имеют высокую хрупкость и склонны к скалыванию, особенно при ударных нагрузках, а сам процесс борирования из расплава солей токсичен и имеет низкую технологичность.

Автором работы [156] показана высокая эффективность восстановления распылителей форсунок диффузионным газофазным титанированием в порошках. Этот процесс позволяет получить увеличение размеров стали Р18 до 20 мкм, а 18Х2Н4ВА до 40 мкм при микротвёрдости поверхности, состоящей из карбидов титана, до 32 ГПа. По результатам испытаний ресурс распылителей, восстановленных диффузионным титанированием, выше в 2...3 раза, чем у серийных.

Вместе с тем, очень высокая микротвёрдость покрытия резко усложняет их механическую обработку, повышает трудоёмкость и себестоимость восстановления. Сам процесс титанирования в порошках для массового производства малотехнологичен и имеет большой расход насыщающих компонентов [20].

Автором работы [200] разработана технология восстановления и упрочнения плунжерных пар, изготовленных из азотированной стали 25Х5МА, газофазным контактным хромотитанированием в контейнерах с плавким затвором. Для уменьшения эффекта пористости, сопровождающего процесс хромирования азотированной стали, было использовано явление различной устойчивости нитридов насыщающих элементов: чем выше нитридообразующая способность насыщающего элемента, тем выше устойчивость его фаз. Титан обладает наибольшим химическим сродством к азоту. При добавке его в хромирующую смесь он первым образует устойчивые по отношению к хрому нитридные фазы и связывает азот в поверхностном слое стали. Хромотитанирование азотированной стали 25Х5МА предложено проводить в порошковой смеси состава, % (по массе): хром (Cr97) – 45%; ферротитан (FeTi – 30) – 5%; оксид алюминия (Al_2O_3) – 47%; хлористый аммоний (NH_3Cl) – 3%. При температуре 1100 °С и времени выдержки 6 часов, изменение размеров деталей составляет 90...100 мкм.

Автором работы [21] разработана технология восстановления и упрочнения плунжерных пар топливного насоса УТН-5 газофазным контактным борохромированием в порошках. Диффузионное насыщение проводится в печах с окислительной атмосферой в контейнерах с плавким затвором. Установлена корреляционная зависимость толщины диффузионного слоя и приращения размеров от режимов насыщения следующих марок сталей: 45, У8А, ХВГ, ШХ15, 30ХГСА, 18Х2Н4ВА, 25Х5МА, Р18. Наличие хрома и цинка в смеси способствует увеличению толщины наращиваемого слоя, снижению хрупкости и ускорению процесса диффузии. Предложен следующий состав порошковой смеси, % (по массе): карбид бора (B_4C) – 30%; хром (Cr97) – 15%; цинк (Zn) – 4%; оксид алюминия (Al_2O_3) – 44%; калий фтористый (KF) – 3%. При температуре 1000 °С и

времени выдержки 4 часа увеличение диаметра образцов из стали марки ХВГ составляет 110...120 мкм, а толщина диффузионного слоя 110...130 мкм. Поверхностная микротвёрдость слоя находится в пределах 19...21 ГПа.

Автором работы [14] исследовано газофазное контактное бороникелирование в порошках с целью получения покрытий, сочетающих высокую микротвёрдость с относительно низкой хрупкостью. Бороникелирование проводилось в печах с окислительной атмосферой в контейнерах с плавким затвором. Рекомендована порошковая смесь следующего состава, % (по массе): карбид бора (B_4C) – 48%; оксид алюминия (Al_2O_3) – 32%; порошок никеля (Ni) дисперсностью 0,04...0,1 мм – 20%. Приращение линейных размеров образцов из стали марок 25Х5МА, ХВГ, 45 и 65Г при температуре 1050 °С и времени выдержки 4 часа составляет соответственно 45, 65, 70 и 78 мкм. Для увеличения приращения размеров деталей, изготовленных из стали марок 25Х5МА и ХВГ, предложен состав, % (по массе): 70% (50% B_4C + 50% Al_2O_3) + 30% НППГ – 75 (порошок композита Ni25Mn). Температура процесса – 1050 °С и время выдержки – 6 часов. Полученное изменение размеров образцов из стали 25Х5МА и ХВГ составляет соответственно 115 и 125 мкм. Поверхностная микротвёрдость диффузионных комплексных покрытий, полученных на основе боридов железа (FeB и Fe_2B) и диборидов никеля (Ni_2B), находится в пределах 16...18 ГПа [98, 100].

Автором работы [73], направленной на разработку той же технологии, основное внимание уделялось решению проблемы механической обработки карбидохромовых покрытий, имеющих поверхностную микротвёрдость в пределах 16,5...22 ГПа. Вместо малопроизводительной механической обработки деталей с применением абразивного инструмента и доводочных паст на основе электрокорунда белого была предложена технология алмазного хонингования и доводки алмазными и карбидтитановыми пастами.

Технология восстановления распылителей форсунок дизелей диффузионным хромированием в вакууме предложена в работе [20]. Осаждение карбида хрома методом контактного хромирования проводится при температуре 1220°С в течение 7 часов. Микротвёрдость получаемого карбидохромового покрытия 15...18 ГПа.

Вакуумная технология диффузионного хромирования применялась также при разработке технологических процессов восстановления и упрочнения деталей регулятора топливных насосов высокого давления (ТНВД), нагнетательных клапанов и деталей поршневых топливоподкачивающих насосов [1, 25, 175].

В работе [101] исследовано неконтактное парофазное хромирование в вакууме с целью уменьшения шероховатости поверхности и исключения механической обработки изделий из стали ХВГ и Х12. Данный способ хромирования позволяет уменьшить шероховатость поверхности образцов на 1...2 класса и получить карбидохромовое покрытие с $Ra_{0,2}$ мкм, так как в отсутствие контакта изделия с частицами хрома в большей степени проявляет эффект залечивания дефектов поверхности (вакансий, микротрещин). Оптимальный режим неконтактного хромирования в вакууме: температура - 1140 °С; время выдержки – 3 ч; грануляция порошка хрома – 0,4...1,5 мм; расстояние от хрома до изделий – 5...10 мм.

По данным работы [129] увеличение толщины наносимого покрытия за счёт длительного времени выдержки при высокой температуре приводит к увеличению зерна в стали. Увеличение толщины покрытий более 150 мкм, имеющих микротвёрдость в пределах 14...19 ГПа, приводит к образованию трещин, что ограничивает применение диффузионных покрытий как способа восстановления плунжерных прецизионных деталей [86, 87, 98]. Структура стали после диффузионного хромирования при температуре более 1100 °С имеет величину эвтектоидного зерна, равную 6...7 баллам, а подвергнутые предварительно термоциклической обработке (ТЦО) – 4 баллам. Комплексный процесс интенсификации диффузионного хромирования по схеме: ТЦО + хромирование + ТЦО не способствует дополнительному приросту толщины диффузионного слоя, но повышает дисперсность структуры до 1...2 баллов. Инерционность нагрева и охлаждения реакционного пространства не позволяет проводить ТЦО при большой массе садки.

Анализ исследований прочности сцеплений диффузионных покрытий с подложкой свидетельствует, что средняя прочность находится в пределах 240...340 МПа [14, 20, 21, 25, 97, 98, 99, 100, 101, 102].

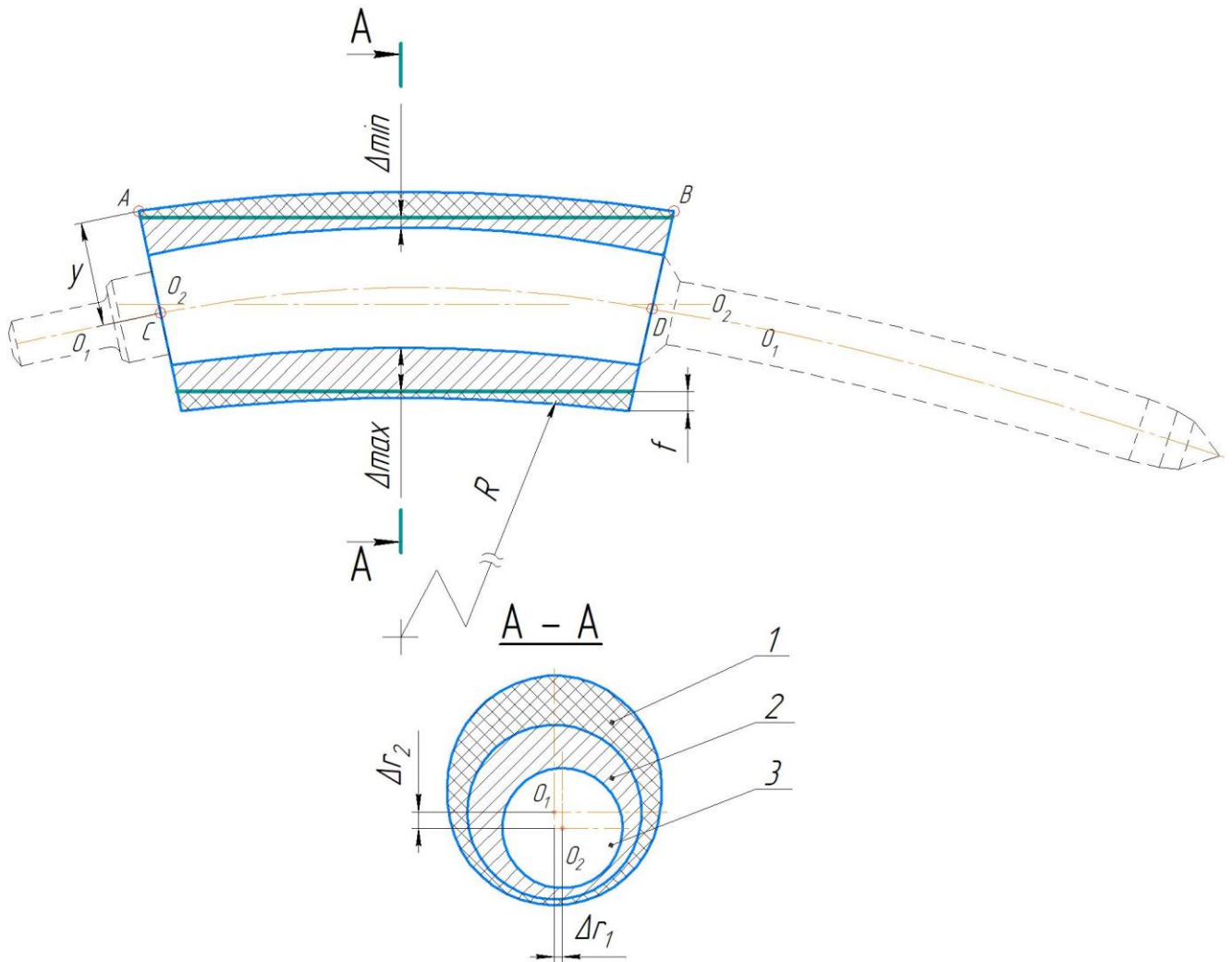
Высокотемпературный нагрев деталей приводит к уменьшению линейных размеров направляющих игл на 13,7 мкм, а длины иглы – на 118,6 мкм. Средняя длина корпусов распылителей уменьшается на 32,7 мкм, а средний диаметр направляющей на 22 мкм. В тоже время изменение линейных размеров деталей, вызванными фазовыми и структурными превращениями для стали P18 – 10...12 мкм, 18X2H4BA – 20...25 мкм [20].

Анализ результатов измерений прогиба деталей показал, что увеличение времени выдержки диффузионного борирования не оказывает существенного влияния на его величину. Это можно объяснить большим соотношением толщины диффузионного слоя к диаметру плунжера, соответственно 1:100 и 1:50. Средняя величина прогиба плунжеров, борированных 2 и 6 ч, после охлаждения контейнеров в течение 8 ч составляет 9,8 и 12,7 мкм, а максимальная достигает 20 мкм. Увеличение скорости охлаждения контейнера приводит к увеличению коробления плунжеров до 35 мкм [87].

Причиной коробления является возникновение градиента температуры от поверхности к сердцевине иглы из-за высокой скорости неравномерности нагрева и охлаждения садки в вакуумной печи. Все это приводит к неодновременному расширению внешних и внутренних объёмов металла из-за его структурных изменений. Устранить коробление возможно с помощью механической обработки (шлифования), но для этого требуется делать дополнительный припуск на толщину наносимого покрытия (рисунок 1.10). После шлифования детали с прогибом наблюдается разнотолщинность диффузионного слоя, которая приводит к различной несущей способности оставшегося нанесённого покрытия, поэтому коробление значительно ухудшает качество прецизионных деталей [87, 129].

Использование способов восстановления деталей с помощью диффузионной металлизации лимитирует число восстанавливаемости любых прецизионных деталей, в том числе и игл распылителя форсунок. Согласно работе [200], их

восстановление возможно при толщине диффузионного слоя, большей величины прогиба деталей, возникшего из-за высокотемпературной термообработки.



y – расстояние от поверхности детали АВ до нейтрального слоя СД, мм;

Δ_{\max} , Δ_{\min} – толщина снятия упрочняющего покрытия, мм;

f – величина прогиба, мм; R – радиус кривизны нейтрального слоя, мм;

Δr_1 , Δr_2 – расстояние смещения оси, мм;

O_1O_1 и O_2O_2 – соответственно, ось детали до упрочнения и после.

1 – удаляемая часть покрытия; 2 – остаточный слой покрытия после механической обработки; 3 – деталь.

Рисунок 1.10 – Прогиб (коробление) цилиндрических деталей после упрочнения высокотемпературными способами.

Недостаток применения механической обработки – это образование эксцентриситета из-за смещения оси Δr . Вследствие этого возникает биение иглы в

корпусе распылителя. Среднее совокупное значение смещения оси Δr находится в интервале до 2 мкм. При ХТО средний прогиб деталей f в зависимости от конфигурации расположения деталей в камере печи для корпуса составляет 10...50 мкм, а для иглы 10...150 мкм. Минимальный прогиб деталей распылителя получается при расположении их конусами вверх. Большой прогиб объясняется достаточно большим отношением диаметра к длине и структурными изменениями в металле при нагреве [20, 87].

Диффузионный слой на основе карбидов хрома в поверхностной зоне имеет наибольшую концентрацию хрома и полезные сжимающие напряжения. Поэтому при механической обработке удаляется наиболее эффективная по износо- и коррозионной стойкости часть диффузионного слоя. На рисунке 1.11 представлена зависимость изменения микротвёрдости покрытия от толщины диффузионного слоя. Максимальная величина микротвёрдости наблюдается на поверхности диффузионного покрытия. Таким образом, механическая обработка при устранении коробления удаляет самый твёрдый слой покрытия, и чем больше припуск, тем ниже микротвёрдость оставшегося покрытия [87, 98, 102].

Высокотемпературный процесс нанесения карбидов с последующим устранением коробления с помощью механической обработки может приводить к повторному короблению деталей из-за релаксации внутренних напряжений в диффузионном слое и разнотолщинности оставшегося покрытия. В процессе хранения плунжерных пар распылителей форсунок может появляться эффект «зависания» [87, 200].

Из рисунка 1.11 видно, что механическая обработка при устранении коробления удаляет самый твёрдый слой покрытия, и чем больше припуск, тем ниже микротвёрдость оставшегося покрытия. Чем выше температура нанесения износостойких покрытий, тем больше изменения в кристаллической решётке металла и больше прогиб прецизионных деталей. Главная причина прогиба связана с воздействием температуры и неодновременным тепловым расширением внешних и внутренних объёмов металла при нагреве и охлаждении. Прогиб по этой причине является неизбежным и необратимым, однако на его величину можно влиять,

изменяя температуру нагрева и скорость охлаждения. Таким образом, можно уменьшить несоосность прецизионных деталей топливной аппаратуры, разнотолщинность упрочняющего диффузионного покрытия и его различную поверхностную микротвёрдость.

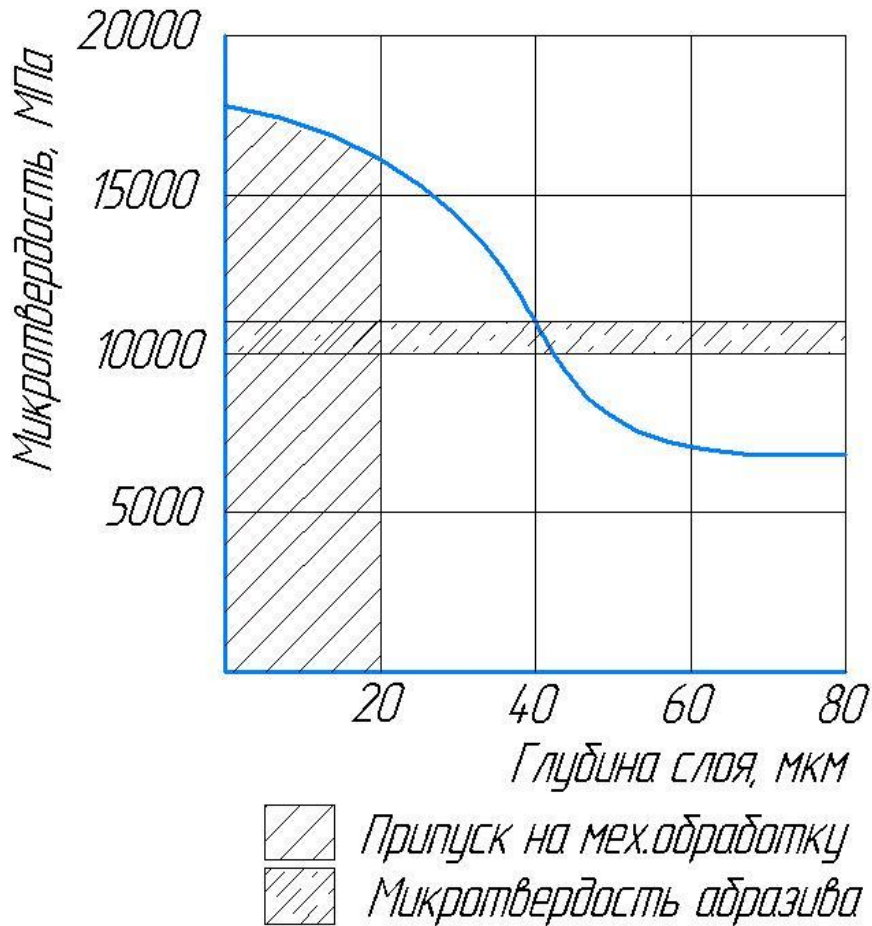


Рисунок 1.11 – Изменение микротвёрдости по глубине диффузионного слоя на стали ХВГ [87, 98, 102].

Влияние перечисленных факторов можно свести к минимуму, изменяя температуру процесса, скорость нагрева и охлаждения деталей, схему упаковки контейнеров и т.д. Хромирование в вакууме с предварительным термоциклированием позволяет получить прирост линейных размеров образцов до 25% [20, 200].

Как показывает анализ, все вышеперечисленные способы требуют высокотемпературного нагрева деталей, который способствует уменьшению модуля упругости стали и приводит к релаксации внутренних напряжений. Структурные изменения в металле приводят к изменению удельного объёма зерна

металла, и это является причиной деформации. Кроме того, увеличение структуры зерна металла влияет на снижение ударной вязкости, что недопустимо, так как запорный конус распылителя постоянно испытывает динамические нагрузки, которые могут привести к отколу носика корпуса распылителя (рисунок 1.6.6) [238].

Таким образом, основными недостатками диффузионной металлизации при восстановлении прецизионных пар являются: длительность процесса, энергоёмкость, высокая температура технологии – 900...1220 °С, рост зерна металла, разная толщина покрытия после механической обработки, смещение осей и релаксация внутренних напряжений, сопровождающаяся изменением геометрической формы детали (коробление).

1.5.2. Углерод – алмазные покрытия DLC

Углерод – алмазные покрытия (DLC) – это технология получения алмазоподобных покрытий. Принцип технологии в следующем, детали устанавливаются в кассеты, которые затем ставятся на карусельный привод установки. Рядом с деталями устанавливаются контейнеры с хромом Cr (IV) и углеродом C (IV) на невращающуюся часть. Плазма в процессе нанесения покрытия содержит в себе ионы этих элементов. Сначала напыляется хром, потому что он, как металл, хорошо сцепляется с матрицей стальных деталей, в которых содержатся молекулы углерода с 4х валентными связями, а затем сам углерод. Молекулы углерода, содержащиеся в плазме, свободно соединяются с молекулами хрома, образуя ковалентные связи. За счёт этого осаждаемое покрытие обладает высокой адгезией.

Режим нанесения покрытия имеет вид гиперболической зависимости, и осуществляется за счёт снижения 100%-ой концентрации хрома в плазме с постепенным переходом на углерод. Это позволяет получать разнообразные композитные покрытия, которые содержат в себе как графитовые, так и алмазные связи. Объём получаемых связей можно регулировать за счёт длительности

воздействия плазмы на обрабатываемую поверхность в момент времени изменения концентрации ионов. Температурный режим технологии 400...600°C.

Износостойкие покрытия наносятся на новые детали как зарубежного, так и отечественного производителя. Микротвёрдость покрытия 2000...3000 HV или 19,5...30 ГПа [239]. Цвет покрытия напоминает побежалость (рисунок 1.12). Толщина покрытия соизмерима с областью видимого светового спектра, т.е. от 0,3...0,8 мкм. Покрытия получаются очень твёрдыми, износостойкими, но хрупкими. Последнее обуславливается, тем что они содержат в себе до 70% алмазных связей [6].



Рисунок 1.12 – Углерод – алмазные покрытия (DLC):

а – игла распылителя форсунки АЗПИ; б – плунжеры ТНВД ЯЗДА.

Восстанавливать детали распылителя форсунки с помощью этой технологии не оптимально ввиду низкой толщины упрочняющего слоя и высокого температурного режима.

Таким образом, технология углерод – алмазные покрытия (DLC) позволяет наносить тонкий износостойкий слой на внешние легкодоступные поверхности деталей, в частности на иглу распылителя. Корпус распылителя не упрочняется, а, следовательно, ресурс распылителя с упрочнённой иглой в сравнении с серийным без упрочнённой детали увеличивается не значительно, что экономически не целесообразно.

1.5.3. Ионно-плазменное напыление PVD

Ионно-плазменное напыление (PVD) – это разновидность катодного способа нанесения материала на поверхность изделия. Данный способ получил широкое применение в разных областях промышленности. Процесс получения покрытия производится в среднем и высоком вакууме или в атмосфере рабочего газа при давлении ниже 100 Па и осуществляется с помощью бомбардировки подложки ионами плазменного вещества в газовом разряде (рисунок 1.13) [133, 183, 207, 239].

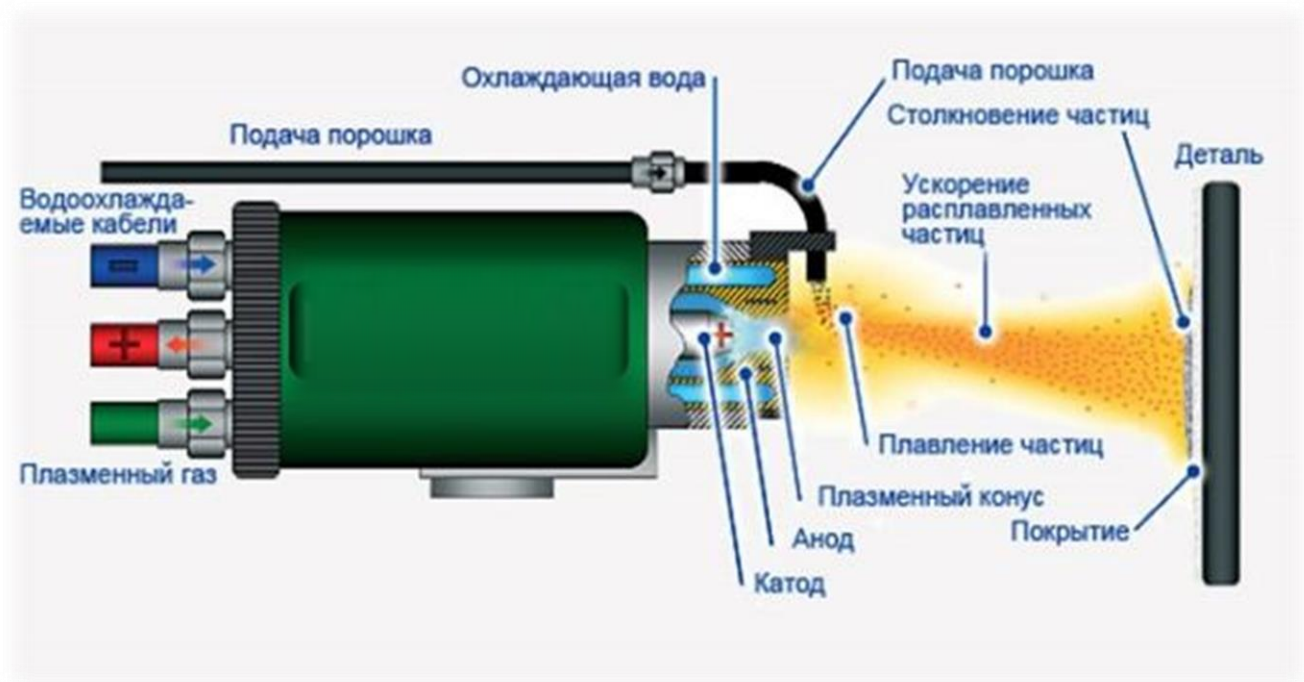


Рисунок 1.13 – Принцип работы осаждения PVD покрытия.

Скорость осаждения зависит от относительного расположения источника и материала. Равномерность покрытия достигается систематизированным движением материала или применением нескольких источников. Данный способ обладает избирательностью, что позволяет наносить покрытие только на определенные части поверхности. Однако, на поверхность детали покрытие наносится только в прямой зоне от источника. Температурный режим нагрева деталей составляет 250...750 °С. В результате этого возможно получать износостойкие плёнки толщиной до 10 мкм [135, 152, 216].

Таким образом, восстановление распылителя форсунки ионно-плазменным способом экономически не целесообразно в виду высокотемпературного режима, приводящего к короблению деталей, недостаточной толщины упрочняющего слоя для компенсации износа и возможности упрочнения только иглы распылителя.

1.5.4. Химическая металлизация

Одним из способов восстановления геометрических размеров изношенных деталей распылителя форсунки и защиты их от коррозии является химическая металлизация. Химическая металлизация – это метод осаждения металлических покрытий, основанный на замещении электронов между веществами окислителем и восстановителем. Существует большое количество разновидностей этого способа: химическая металлизация из жидкой фазы, электрохимическая (гальваническая) металлизация и химическая парофазная металлизация (CVD-метод) [199, 203, 213].

Химическая металлизация из жидкой фазы — это восстановление металлов из растворов солей или комплексных соединений. Ярким примером является реакция серебряного зеркала. Главным недостатком этого метода является отсутствие избирательности процесса восстановления, так как он осуществляется на всех поверхностях доступных раствору и в объёме раствора, что усложняет технологический процесс и снижает коэффициент использования реактива. Сорбционный метод, являющийся одним из разновидностей этого метода, в промышленности получил наибольшее применение для металлизации пластмасс из растворов солей или комплексных соединений. Недостатками этого способа является насыщенность многочисленными элементами состава растворов и многостадийность процесса, а, следовательно, при утилизации раствора возникает риск нанесения вреда окружающей среде [213, 214].

Электролитическая металлизация – это осаждение металлических покрытий на детали и изделия в специальных ваннах с помощью пропускания электрического тока через раствор. Способ получил достаточно широкое применение в

промышленности и является одним из дешёвых, что позволяет наносить тугоплавкие покрытия на основе хрома, никеля, серебра, меди, цинка и других металлов [13, 23, 203].

Получаемые покрытия мягкие, но обладают хорошей антикоррозионной стойкостью. Данным способом в зависимости от продолжительности ведения металлизации регулируется толщина наносимого покрытия, которая может достигать более 1,2 мм, что достаточно для восстановления всех пригодных для ремонта распылителей [199, 236]. Температурный режим формирования покрытия не превышает 100°С.

Однако, при осаждении на поверхности иглы распылителя гальванического хрома микротвёрдость осадка достигает 4000...6000 МПа. Для повышения микротвёрдости до уровня 7500...11000 МПа и увеличения адгезии покрытия к поверхности детали ведут термообработку с применением высокого отпуска при температуре 400...500°С. Микротвёрдость до 15000 МПа можно получить с последующей цементацией покрытия [230, 233].

К недостаткам технологического процесса следует отнести недостаточно высокое качество сцепления хромового покрытия с восстанавливаемой деталью из-за его хрупкости, наличия большого количества пор и высоких внутренних напряжений в слое. При эксплуатации восстановленных распылителей данными покрытиями в момент замещения абразивных частиц в направляющей распылителя возможны сколы хромового покрытия и заклинивание иглы, что недопустимо.

Химическая парофазная металлизация (CVD метод) – является одной из разновидностей химической металлизации. Износостойкое покрытие образуется путём термического разложения металлоорганических соединений (МОС) на нагретой подложке в результате осуществления термодинамических реакций в вакууме. Физико-механические свойства износостойкого покрытия зависят от температуры нагрева деталей. Получаемые покрытия обладают высокой микротвёрдостью и плотностью, максимальная толщина лимитируется остаточными напряжениями и в среднем составляет 200 мкм, скорость формирования покрытий до 10 мкм/мин; чистота получаемой поверхности

Ra0,05...0,32 мкм, температурный режим металлизации от 70 до 1000 °С [158, 213, 230].

Прочность сцепления покрытия с подложкой составляет 35 МПа, что обеспечивается подготовкой деталей к осаждению покрытия путём задачи поверхностям шероховатости на уровне Ra0,4 и их очистки [213, 230]. В работах [112, 113, 115, 230] предложено применять адгезионный подслоя из никеля, толщина которого должна составлять 1...5 мкм, и далее осаждают требуемое покрытие. Наиболее интересные реактивы, применяемых в этой технологии при формировании износостойкого покрытия, представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - МОС и технологические параметры их разложения [86].

Группа ПСХЭ	Основной материал покрытия	Исходное летучее соединение	Температура нагрева, °С		Теоретическая микротвёрдость карбида для основного материала покрытия
			исходного соединения	подложки	
VI	Cr	Cr(CO) ₆	40-80	300-700	до 18 ГПа
	Mo	Mo(CO) ₆	30-60	450-700	до 14,99 ГПа
	W	W(CO) ₆	40-70	450-700	до 17,16 ГПа
VIII	Fe	Fe(CO) ₅	20-30	100-300	до 5,8 ГПа
	Co	Co ₂ (CO) ₈	20-25	180-220	до 8 ГПа
	Ni	Ni(CO) ₄	20-30	100-300	до 9 ГПа

Анализируя информацию в таблице 1.6 можно сделать вывод о том, что наиболее предпочтительное металлоорганическое соединение для применения в восстановлении деталей распылителей форсунок с точки зрения микротвёрдости получаемых покрытий и минимальной температуры ведения металлизации является гексакарбонил хрома (Cr(CO)₆).

В таблице 1.7 представлены возможные способы восстановления иглы и корпуса распылителя форсунки топливной аппаратуры, которые позволяют получать износостойкие покрытия на поверхностях стальных деталей.

Таблица 1.7 – Способы восстановления деталей распылителей форсунок ДВС.

Способы	Недостатки
Перекомплектовка	<ul style="list-style-type: none"> • Невозможность восстановления ремфонда в полном объёме.
Диффузионная металлизация (ХТО)	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая температура технологии до 1200 °С; • Рост зерна металла; • Разнотолщинность покрытия; • Смещение осей; • Релаксация внутренних напряжений.
Углерод – алмазные покрытия (DLC – метод)	<ul style="list-style-type: none"> • Толщина покрытий до 0,8 мкм; • Температура нагрева деталей до 600 °С.
Ионно-плазменное напыление (PVD – метод)	<ul style="list-style-type: none"> • Толщина покрытий до 10 мкм; • Температура нагрева деталей более 250 °С.
Электролитическая металлизация	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая пористость; • Склонность к растрескиванию; • Микротвёрдость до 15 ГПа; • Экологическая опасность.
Парофазная химическая металлизация (CVD-метод)	<ul style="list-style-type: none"> • Температура нагрева деталей от 300 °С; • Толщина покрытия до 1 мм.

Таким образом, наибольший интерес для повышения износо- и коррозионной стойкости распылителей форсунок представляет способ парофазной химической металлизации (CVD – метод) в вакууме путём термического разложения металлорганического соединения гексакарбонила хрома $\text{Cr}(\text{CO})_6$.

Автором работ [213, 214] установлена оптимальная температура 300 °С в условиях вакуума 15...10 Па. Авторами работ [86, 89, 230] установлена минимальная температура, при которой возможно формирование карбида хрома – 200 °С в условиях вакуума 20...1 Па. Однако отмечено, при этой температуре химическая реакция неустойчива и приводит к колебанию температуры подложки на 10 – 20 °С, что связано с эндотермичностью процесса терморазложения гексакарбонила хрома. Как следствие, покрытие получается с горизонтально-слоистым строением, неравномерной структурой и с включением примесей оксида хрома, что сопровождается увеличенным расходом реактива. Установлена оптимальная температура, при которой формируется карбидохромовое покрытие, 220...250 °С.

Процессы упрочнения или восстановления деталей с износами до 200 мкм, экономически эффективно реализовать с применением однослойных упрочняюще-восстанавливающих CVD-покрытий, полученных с использованием единственного реагента на основе хрома (монокарбонильный процесс).

Таким образом, наиболее перспективным способом восстановления распылителей форсунок, исключая деформацию деталей, является низкотемпературная технология получения карбидохромовых покрытий с помощью парофазной химической металлизации (CVD – метод) в вакууме.

1.6. Основные выводы, задачи и цели исследования

Износ деталей распылителей форсунок автотракторных дизелей происходит из-за загрязнённости дизельного топлива и приводит к снижению мощности двигателя, увеличенному расходу топлива, загрязнению окружающей среды и снижению производительности машины и труда.

Основные требования к карбидохромовому покрытию на изнашиваемых поверхностях распылителя форсунки:

- Микротвёрдость покрытия не менее 16,8 ГПа;
- Толщина не менее 100 мкм;
- Адгезия не менее 15 МПа.

Эффективным решением повышения надёжности распылителей форсунок является разработка и совершенствование упрочняющих технологий восстановления изношенных деталей. Наиболее перспективным способом восстановления распылителей форсунок является получение карбидохромовых покрытий методом парофазной химической металлизации (CVD – метод) в вакууме.

В целях сохранения физико-механических свойств иглы и корпуса распылителя, исключения повторной закалки деталей, необходимо разработать режим парофазной металлизации, при котором будет проводиться равномерное

осаждение карбидохромового покрытия при температуре ниже низкого отпуска сталей, применяемых для изготовления деталей распылителя форсунки, до 200°C.

Актуальной задачей является разработка новой технологии восстановления и упрочнения распылителей форсунок. Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать следующие требования к разрабатываемой технологии:

1. Низкотемпературное осаждение карбидохромового покрытия, исключающее коробление и необходимость проведения повторной закалки деталей;
2. Получение упрочняющего покрытия с микротвёрдостью не менее 16,8 ГПа;
3. Возможность нанесения покрытия на труднодоступные поверхности деталей, в том числе и на распыляющие отверстия диаметром 0,2 мм;
4. Получение шероховатости на поверхности покрытия Ra0,05;
5. Снижение времени осаждения карбидохромового покрытия CVD-методом в сравнении с диффузионным хромированием в вакууме с 8 часов до 1 часа;
6. Обеспечение адгезии упрочняющего покрытия с подложкой не менее 15 МПа.

В соответствии с поставленной целью в работе решить следующие задачи:

1. Разработать технологию восстановления распылителей форсунок ДВС;
2. Определить термодинамические условия осаждения карбидохромового покрытия при минимальной температуре CVD-метода;
3. Определить критическую и оптимальную толщину карбидохромового покрытия на деталях распылителей форсунок автотракторных дизелей;
4. Разработать устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки;
5. Определить оптимальные режимы CVD-метода, обеспечивающие низкотемпературное осаждение карбидов хрома;
6. Исследовать физико-механические свойства упрочняющего покрытия;
7. Провести испытания карбидохромового покрытия на контактно-абразивное и коррозионное изнашивание;

8. Провести эксплуатационные испытания восстановленных распылителей форсунок автотракторных дизелей;
9. Дать технико-экономическую оценку эффективности внедрения разработанной технологии восстановления распылителей форсунок и их эксплуатации.

ГЛАВА 2. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДОХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ХИМИЧЕСКОЙ ПАРОФАЗНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

2.1. Термодинамические условия осаждения карбидохромового покрытия при минимальной температуре CVD-метода

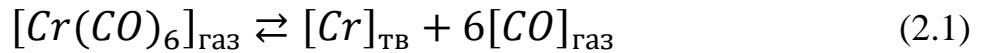
Одно из важнейших свойств любой термодинамической системы можно сформулировать следующим образом: *«Любая система, будучи помещённая в неизменные внешние условия, обязательно приходит в некоторое состояние, в котором она и будет находиться сколь угодно долго»* [17]. Из этого следует, что существует такое термодинамическое равновесие, при котором возможно получать на поверхностях деталей равномерное износостойкое покрытие, состоящее из карбида хрома. Отсюда, необходимо определить и обеспечить такие условия проведения химических реакций разложения гексакарбонила хрома и формирования карбида хрома, при которых будет осаждаться требуемое по физико-механическим свойствам покрытие.

Карбид хрома Cr_3C_2 – это износостойкое покрытие, осаждается на поверхностях стальных деталей в результате термического разложения паров гексакарбонила хрома $\text{Cr}(\text{CO})_6$ путём термодинамического соединения молекул и радикалов, входящих в состав карбонила. Исследователями [113, 213, 230] установлены основные реакции, сопровождающиеся при разложении гексакарбонила хрома и кинетика CVD-процессов. Определены условия, при которых осаждается карбид хрома, и факторы, влияющие на его формирование [151].

Химическая реакция разложения $\text{Cr}(\text{CO})_6$ осуществляется при контакте паров карбонила с нагретой подложкой в реакторе CVD-установки. Температура нагрева подложки, в свою очередь, определяет скорость разложения паров, интенсивность

и скорость роста карбидохромового покрытия, что предопределяет состав и структуру покрытия.

Уравнение реакции разложения гексакарбонила хрома [117, 213, 229, 230, 249]:



Остаточное давление или давление вакуума в реакторе смещает направление термодинамической реакции термического разложения гексакарбонила хрома вправо и влияет на ход процесса. Установлено, что давление вакуума до 1000 Па смещает направление реакции в сторону образования хрома и оксида углерода (II) и снижает теплопроводность паровой фазы гексакарбонила хрома. При этом десорбция молекул монооксида углерода не осуществляется даже вне зависимости от температурного режима, установленного в реакционной камере CVD-установки [213].

Давление вакуума от 1000 до 0,1 Па позволяет проводить осаждение карбидохромового покрытия на нагретых поверхностях подложки. С повышением степени разреженности в этом интервале давлений снижается температура металлизации, и покрытие формируется с меньшим количеством примесей углерода и оксидов хрома. Давление вакуума 0,1...0,001 Па снижает количество примесей в покрытии и скорость формирования покрытия. Более низкое давление вакуума нарушает адсорбционно-десорбционный механизм образования карбида хрома, и осаждение износостойкого покрытия на стальных деталях не осуществляется [213].

В работах [213, 229, 230, 249, 250] записаны и исследованы химические реакции, которые протекают в реакционной камере в результате термораспада $Cr(CO)_6$, согласно закона Гесса. Некоторые из возможных термодинамических реакций технически неосуществимы. Исследование по закону Гесса, не обеспечивает достаточно точного определения температуры начала металлизации в вакууме, так как определяет тепловой эффект состояния исходных веществ и продуктов реакции при стандартных условиях.

В этой работе, в отличие от предыдущих, впервые предложено использовать гипотезу двух приближений для определения минимальной температуры термораспада гексакарбонила хрома с последующей химической парофазной металлизацией в условиях вакуума.

В целях определения минимально возможной температуры термораспада гексакарбонила хрома и осаждения карбидохромового покрытия на прецизионные детали распылителя форсунки при первом приближении требуется установить возможность протекания химических реакций, осуществляемых в реакционной камере CVD-установки, используя закон Гесса. При втором приближении определить зависимость снижения температуры разложения карбонила и начала ведения металлизации в условиях вакуума.

Оценить возможность протекания термодинамических реакций и определить температуру начала их осуществления, в первом приближении, возможно методом изменения изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса), которая описывается уравнением [33, 96, 143, 213, 214, 226, 227, 230]:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0 \quad (2.2)$$

где ΔG_T^0 – абсолютная величина изобарно-изотермического потенциала или энергия Гиббса, кДж: при $\Delta G_T^0 < 0$ химическая реакция протекает полностью, $\Delta G_T^0 > 0$ химическая реакция не возможна; ΔH_{298}^0 , ΔS_{298}^0 – стандартные изменения энтальпии (кДж/моль) и энтропии (Дж/(К·моль)) при давлении 101325 Па и температуре 298,16 К; T – температура начала протекания реакции, К.

Температура, при которой возможна термодинамическая реакция, К [17, 120, 136, 170, 230]:

$$T = \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0} \quad (2.3)$$

В термодинамической системе, как отмечалось ранее, между молекулами веществ протекают химические реакции по термическим уравнениям состояния термодинамической системы. Согласно следствию закона Гесса, тепловой

эффект химической реакции равен разности образования сумм теплового эффекта продуктов и исходных веществ [17, 33, 96, 136, 170, 213, 214, 226, 227, 230]:

$$\Delta H_{298}^0 = \sum H_{298}^0 \text{ конечных веществ} - \sum H_{298}^0 \text{ начальных веществ} \quad (2.4)$$

$$\Delta S_{298}^0 = \sum S_{298}^0 \text{ конечных веществ} - \sum S_{298}^0 \text{ начальных веществ} \quad (2.5)$$

Значения энтальпии и энтропии для расчёта теплового эффекта химических реакций используются для нормальных условий и берутся из справочников [15, 24, 177, 193, 230].

Таким образом, при первом приближении возможно определить ориентировочную температуру разложения гексакарбонила хрома, установить прохождение возможных химических реакций и получить карбид хрома на поверхностях стальных деталей распылителя форсунки, используя закон Гесса и энергию Гиббса.

При расчёте термодинамических реакций, протекающих в реакционной камере CVD-установки, возможно предложить использовать второе приближение, которое позволит оценить температуру начала термического разложения гексакарбонила хрома и начала процесса ведения металлизации в условиях вакуума.

Согласно работам [105, 125, 226, 227, 246], исходя из первого закона термодинамики и второго равенства Клаузиуса, значения внутренней энергии, энтальпии, энергии Гельмгольца и энергии Гиббса зависят от температуры и давления, установленных в термодинамической системе, согласно теореме Коши и уравнениям Максвелла:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \quad (2.6)$$

В закрытой термодинамической системе с обратимыми процессами свободную энергию Гиббса для молекул реакционной среды, применяемой в

парофазной металлизации, можно получить из выражений первого и второго закона термодинамики [17, 105, 125, 226, 227]:

$$dG = -SdT + VdP \quad (2.7)$$

При постоянной температуре ($T=0$ или $dT=0$) свободная энергия Гиббса, равна [158, 227]:

$$dG = VdP \quad (2.8)$$

где $V = f(P)$ – функция изменения объёма реакционной среды от давления.

Следовательно, зависимость свободной энергии Гиббса при изменении давления ($T=const$) будет иметь следующий вид [125, 226, 227]:

$$dG(T, P) = dG(T) + \int_{P_c}^{P_{изм}} VdP \quad (2.9)$$

где $dG(T)$ – свободная энергия Гиббса при установившемся давлении, кДж; P_c и $P_{изм}$ – изменение давления от стандартных значений до установившегося, соответственно: $P_c \neq P_{изм}$, Па; V – объём реакционной среды равномерно заполненный в реакционной камере, м³.

Согласно уравнению идеального газа [105, 125, 226, 227] $PV = RT$ или $V = \frac{RT}{P}$ интеграл функции, уравнение 2.8, будет иметь вид:

$$\int_{P_c}^{P_{изм}} VdP = RT \int_{P_c}^{P_{изм}} \frac{dP}{P} = RT \ln \frac{P_{изм}}{P_c} = RT \ln \tilde{P} \quad (2.10)$$

тогда

$$dG(T, P) = dG(T) + RT \ln \tilde{P} \quad (2.11)$$

где \tilde{P} – нормированное давление газовой смеси, Па; R – универсальная газовая постоянная $R = 8,314$ кДж/кмоль·К.

Определить влияние давления вакуума на энтропию возможно из выражения энергии Гиббса (2.6) при давлении $P_c = P_{изм}$:

$$dG(T, P) = \Delta H(T) - T\Delta S(T, P) \quad (2.12)$$

Из которого следует

$$S(T, P) = \frac{1}{T} [\Delta H(T) - dG(T, P)] \quad (2.13)$$

В соответствии с уравнениями 2.2, 2.7, 2.11 и 2.13 и при давлении $P_c \neq P_{\text{изм}}$ получим:

$$dG(T, P) = \Delta H(T) - T\Delta S(T) + RT\ln\tilde{P} \quad (2.14)$$

Следовательно, с изменением давления изменяется энтропия химических веществ, находящихся в реакционной камере.

Температура термодинамических реакций в результате влияния давления вакуума будет определяться выражением:

$$T = \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0 - R\ln\tilde{P}} \quad (2.15)$$

Следовательно, погрешность в изменении температуры прохождения химической реакции в условиях вакуума при рассмотрении двух теорий приближений определяется в соответствии с формулами 2.3 и 2.15:

$$T = \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0} - \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0 - R\ln\tilde{P}} \quad (2.16)$$

Таким образом, увеличение давления вакуума приводит к снижению температуры протекания химических реакций путём увеличения энтропии веществ, что позволяет затрачивать на осуществление термодинамических реакций меньшее количество тепловой энергии.

2.1.1. Термодинамика протекания химических реакций при осаждении карбидохромового покрытия

В данном параграфе рассматривается возможность протекания химических реакций при термическом разложении соединений гексакарбонила хрома и определяется минимальная температура его разложения.

Согласно первому приближению, применяя закон Гесса и энергию Гиббса, для расчёта значения теплового эффекта химических реакций у простых веществ, задействованных и получаемых при разложении $Cr(CO)_6$, используют стандартные мольные значение энтальпии и энтропии, которые термодинамически устойчивы при 1 атм. ($1,013 \cdot 10^5$ Па) и температуре 298,16 К, и берут их из справочников (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Стандартные мольные значение энтальпии и энтропии [15, 24, 177, 193, 230].

Вещество	Энтальпия ΔH_{298}^0 , кДж/моль	Энтропия ΔS_{298}^0 , Дж/(К·моль)
$Cr(CO)_6$	-1078	+314
Cr	0	+23,6
CO	-110,52	+197,54
CO ₂	-393,51	+213,67
C	0	+5,74
Cr ₃ C ₂	-91	+84,935
Cr ₂ O ₃	-1140,56	+81,17
CrO ₃	-590,36	+73,22
* CrO ₂	-61	-

* - Ион соединения, участвующий в реакции.

В соответствии с уравнениями 2.2 – 2.5 проведены расчёты по возможным химическим реакциям, согласно работ [136, 170, 214, 230, 249, 250], проходящим в

реакционной камере CVD-установки. В таблице 2.2 и 2.3 представлены результаты расчёта химических реакций, соответственно при первом и втором приближении. В таблице 2.4 представлена матрица энергии Гиббса в зависимости от температуры и давления в системе CVD-установки.

Результатами расчёта (таблицы 2.2, 2.3 и 2.4) термического разложения гексакарбонила хрома и протекающих термодинамических реакций в реакционной камере CVD-установки при образовании карбида хрома нами установлено:

- Минимальная температура разложения гексакарбонила хрома при стандартных условиях – 191 °С.
- Минимальная температура разложения гексакарбонила хрома при давлении вакуума 0,001 Па – 123 °С.
- Температура начала ведения металлизации совпадает с термическим разложением $Cr(CO)_6$.
- В реакционной камере одновременно проходят 11 термодинамических реакций вместо 19 возможных.
- Реакция термического разложения эндотермична, а остальные термодинамические реакции, протекающие в реакционной камере, экзотермичны.
- С увеличением степени вакуума увеличивается изобарно-изотермический потенциал всех термодинамических реакций.

Таким образом, термодинамическая возможность разложения гексакарбонила хрома в условиях увеличения давления вакуума от нормальных до 0,001 Па приводит к снижению температуры начала осаждения карбида хрома от 191 °С до 123 °С, что позволяет снизить температуру нагрева подложки на 68 °С.

Учитывая погрешность измерений и неравномерность нагрева деталей при осаждении на них покрытия, минимальная теоретическая температура проведения металлизации для разработанной технологии должна быть 150 °С.

Таблица 2.2 – Результаты расчёта химических реакций при разложении $\text{Cr}(\text{CO})_6$ при нормальных условиях.

№	Химическая реакция	ΔH_{298}^0 , кДж/ моль	ΔS_{298}^0 , Дж/ (К·моль)	Температура $\Delta G=0$		Изобарно-изотермический потенциал ΔG , кДж						
						При температуре, Кельвин, К / Цельсий, °С						
				К	°С	373 100	423 150	473 200	523 250	573 300	623 350	673 400
1	$\text{Cr}(\text{CO})_6 \leftrightarrow \text{Cr} + 6\text{CO}$	415	895	464	191	81	36	-8	-53	-98	-143	-187
2	$2\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$	-172	-176	982	709	-107	-98	-89	-81	-72	-63	-54
3	$2\text{Cr} + 3\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C}$	-809	-541	1 494	1 221	-607	-580	-553	-526	-499	-472	-445
4	$11\text{Cr} + 6\text{CO} \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$	-791	-1 044	758	485	-401	-349	-297	-245	-193	-140	-88
5	$13\text{Cr} + 6\text{CO} \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$	-1 891	-1 075	1 759	1 486	-1 490	-1 436	-1 383	-1 329	-1 275	-1 221	-1 168
6	$3\text{Cr} + 4\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2 + 2\text{CO}_2$	-436	-349	1 250	977	-306	-288	-271	-254	-236	-219	-201
7	$4\text{Cr} + 3\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C}$	-1 101	-556	1 980	1 707	-893	-865	-838	-810	-782	-754	-727
8	$17\text{Cr} + 6\text{CO}_2 \leftrightarrow 4\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$	-2 474	-1 104	2 242	1 969	-2 062	-2 007	-1 952	-1 897	-1 842	-1 787	-1 731
9	$2\text{Cr}_3\text{C}_2 + 9\text{CO} \leftrightarrow 3\text{Cr}_2\text{O}_3 + 13\text{C}$	-2 245	-1 630	1 378	1 105	-1 637	-1 556	-1 474	-1 393	-1 311	-1 230	-1 148
10	$\text{Cr} + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{CrO}_2 + 2\text{C}$	160	-407	-393	-666	312	332	353	373	393	414	434
11	$\text{Cr} + 3\text{CO} \leftrightarrow \text{CrO}_3 + 3\text{C}$	-259	-526	492	219	-63	-36	-10	16	42	69	95
12	$4\text{Cr} + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{CrO}_2 + \text{Cr}_3\text{C}_2$	69	-405	-171	-444	220	240	260	281	301	321	341
13	$\text{Cr} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CrO}_2 + \text{C}$	333	-232	-1 436	-1 709	419	430	442	454	465	477	488
14	$2\text{Cr} + 3\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CrO}_3 + 3\text{C}$	-0	-525	0	-273	195	222	248	274	300	327	353
15	$5\text{Cr} + 2\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CrO}_2 + \text{Cr}_3\text{C}_2$	574	-460	-1 247	-1 520	746	769	792	815	838	861	884
16	$13\text{Cr} + 6\text{CO}_2 \leftrightarrow 4\text{CrO}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$	-273	-1 041	263	-10	115	167	219	271	323	375	427
17	$\text{CrO}_2 + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr} + 2\text{CO}_2$	-505	56	-9 040	-9 313	-526	-529	-531	-534	-537	-540	-543
18	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + 6\text{CO} \leftrightarrow 3\text{CrO}_2 + 8\text{C}$	571	-1 224	-467	-740	1 028	1 089	1 150	1 211	1 273	1 334	1 395
19	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + 9\text{CO} \leftrightarrow 3\text{CrO}_3 + 11\text{C}$	-685	-1 580	434	161	-96	-17	62	141	220	299	378

Расшифровка обозначений:

« - » Реакция возможна

« + » Реакция не возможна

Таблица 2.3 – Результаты расчёта химических реакций при разложении $\text{Cr}(\text{CO})_6$ в условиях вакуума 0,01 Па.

№	Химическая реакция	Температура $\Delta G=0$		Изменение температуры металлизации	Изобарно-изотермический потенциал ΔG , кДж						
					При температуре, Кельвин, К / Цельсий, °С						
		К	°С	К	373	423	473	523	573	623	673
1	$\text{Cr}(\text{CO})_6 \leftrightarrow \text{Cr} + 6\text{CO}$	403	130	-60	31	-20	-72	-123	-175	-226	-278
2	$2\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$	4 150	3 877	3 169	-157	-155	-153	-151	-149	-147	-145
3	$2\text{Cr} + 3\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C}$	1 986	1 713	492	-657	-637	-616	-596	-576	-555	-535
4	$11\text{Cr} + 6\text{CO} \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$	869	596	112	-451	-406	-360	-315	-269	-224	-179
5	$13\text{Cr} + 6\text{CO} \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$	2 010	1 737	251	-1 540	-1 493	-1 446	-1 399	-1 352	-1 305	-1 258
6	$3\text{Cr} + 4\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2 + 2\text{CO}_2$	2 032	1 759	781	-356	-345	-334	-324	-313	-302	-292
7	$4\text{Cr} + 3\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C}$	2 610	2 337	630	-943	-922	-901	-880	-859	-838	-817
8	$17\text{Cr} + 6\text{CO}_2 \leftrightarrow 4\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$	2 552	2 279	310	-2 113	-2 064	-2 016	-1 967	-1 919	-1 870	-1 822
9	$2\text{Cr}_3\text{C}_2 + 9\text{CO} \leftrightarrow 3\text{Cr}_2\text{O}_3 + 13\text{C}$	1 501	1 228	124	-1 687	-1 612	-1 538	-1 463	-1 388	-1 313	-1 239
10	$\text{Cr} + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{CrO}_2 + 2\text{C}$	-586	-859	-193	262	276	289	303	317	330	344
11	$\text{Cr} + 3\text{CO} \leftrightarrow \text{CrO}_3 + 3\text{C}$	661	388	169	-113	-93	-74	-54	-34	-15	5
12	$4\text{Cr} + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{CrO}_2 + \text{Cr}_3\text{C}_2$	-255	-528	-85	170	183	197	210	224	238	251
13	$\text{Cr} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CrO}_2 + \text{C}$	-3 413	-3 686	-1 977	369	374	379	383	388	393	398
14	$2\text{Cr} + 3\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CrO}_3 + 3\text{C}$	0	-273	0	145	165	184	204	224	243	263
15	$5\text{Cr} + 2\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CrO}_2 + \text{Cr}_3\text{C}_2$	-1 759	-2 032	-512	696	712	728	745	761	777	794
16	$13\text{Cr} + 6\text{CO}_2 \leftrightarrow 4\text{CrO}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$	301	28	39	65	110	156	201	246	292	337
17	$\text{CrO}_2 + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr} + 2\text{CO}_2$	-2 658	-2 931	6 382	-576	-585	-595	-604	-614	-623	-633
18	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + 6\text{CO} \leftrightarrow 3\text{CrO}_2 + 8\text{C}$	-524	-797	-57	978	1 032	1 087	1 141	1 196	1 250	1 305
19	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + 9\text{CO} \leftrightarrow 3\text{CrO}_3 + 11\text{C}$	474	201	40	-146	-74	-1	71	143	215	288

Расшифровка обозначений:

« - » Реакция возможна

« + » Реакция не возможна

Таблица 2.4 – Матрица изменения изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса) при разложении гексакарбонила хрома в зависимости от давления вакуума.

Температура подложки, °С	Давление вакуума в реакторе CVD-установки, Па								
	101 325	10 000	1 000	100	10	1	0,1	0,01	0,001
	Изобарно-изотермический потенциал ΔG , кДж								
50	125,85	119,63	113,44	107,26	101,08	94,89	88,71	82,53	76,34
100	81,10	73,92	66,78	59,64	52,50	45,36	38,22	31,08	23,94
150	36,36	28,22	20,12	12,02	3,93	-4,17	-12,27	-20,37	-28,47
200	-8,38	-17,49	-26,54	-35,60	-44,65	-53,71	-62,76	-71,82	-80,87
250	-53,12	-63,19	-73,20	-83,22	-93,23	-103,24	-113,25	-123,26	-133,28
300	-97,86	-108,90	-119,86	-130,83	-141,80	-152,77	-163,74	-174,71	-185,68
350	-142,61	-154,60	-166,53	-178,45	-190,38	-202,31	-214,23	-226,16	-238,09
400	-187,35	-200,30	-213,19	-226,07	-238,96	-251,84	-264,72	-277,61	-290,49
Температура начала металлизации, °С	191,00	181,00	172,00	163,00	154,00	146,00	138,00	130,00	123,00
Исследователи	[213]			[230]			Исследование текущей работы		

Результаты расчёта изобарно-изотермического потенциала реакции разложения гексакарбонила хрома и побочных термодинамических реакций показали, что основная реакция идёт со значительной глубиной превращения с образованием примесей карбидной и оксидной фаз, концентрация которых зависит от температурного режима осаждения.

Приведённая матрица изменения энергии Гиббса в зависимости от давления вакуума (таблица 2.4) свидетельствует о том, что: исследователем [213] была рекомендована оптимальная температура осаждения карбидохромового покрытия 300 °С и давлении вакуума 100...1,0 Па при изобарно-изотермическом потенциале равном 130...152 кДж, что позволяет получать максимальную скорость привеса и вести стабильное осаждение карбида хрома; исследователем [230] рекомендована оптимальная температура осаждения карбидохромового покрытия 200...250 °С и давлении вакуума 10...1,0 Па при изобарно-изотермическом потенциале равном 44...103 кДж, что также обеспечивает стабильное осаждение. Следовательно, осаждение карбидохромового покрытия при температуре 123...191 °С возможно с учётом давления вакуума в системе 0,1...0,001 Па, что соответствует изобарно-изотермическому потенциалу 1...80 кДж.

Проанализированы данные, представленные в таблице 2.4. Установлено уравнение регрессии и построена функция отклика (рисунок 2.1) зависимости энергии Гиббса (ось аппликата) от температуры подложки (ось абсцисс) и давления вакуума (ось ординат).

Уравнение регрессии, определяющее изобарно-изотермический потенциал, описывается следующей формулой:

$$G(T, P) = 141,59 - 0,98T + 0,004P - 7,94 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 9,35 \cdot 10^{-7} \cdot TP - 4,1 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 \quad (2.17)$$

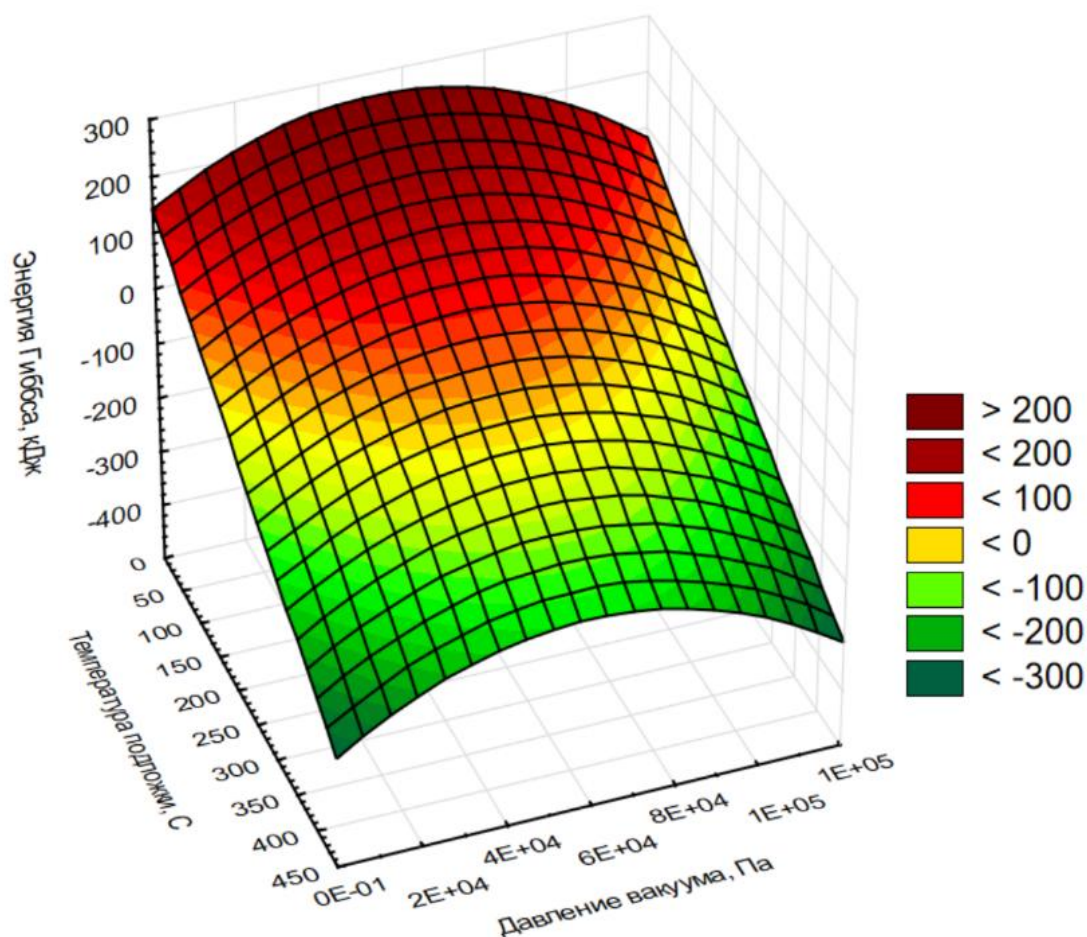


Рисунок 2.1. Функция отклика изменения энергии Гиббса от давления вакуума и температуры подложки.

Таким образом, разложение паров гексакарбонила хрома зависит от температуры подложки и давления вакуума. Изменяя степень вакуума возможно снижать температуру термораспада гексакарбонила хрома.

2.2. Определение необходимого уровня твёрдости и несущей способности карбидохромового покрытия

Изнашивание поверхностей трения достаточно хорошо исследованы авторами широкоизвестных работ [40, 134, 173, 215, 225] и другими учёными. Установлены общепринятые принципы, зависимости и свойства взаимодействия тел трения. Разрабатываются многочисленные компьютерные программы, которые позволяют проводить виртуальные испытания с достаточно высокой точностью

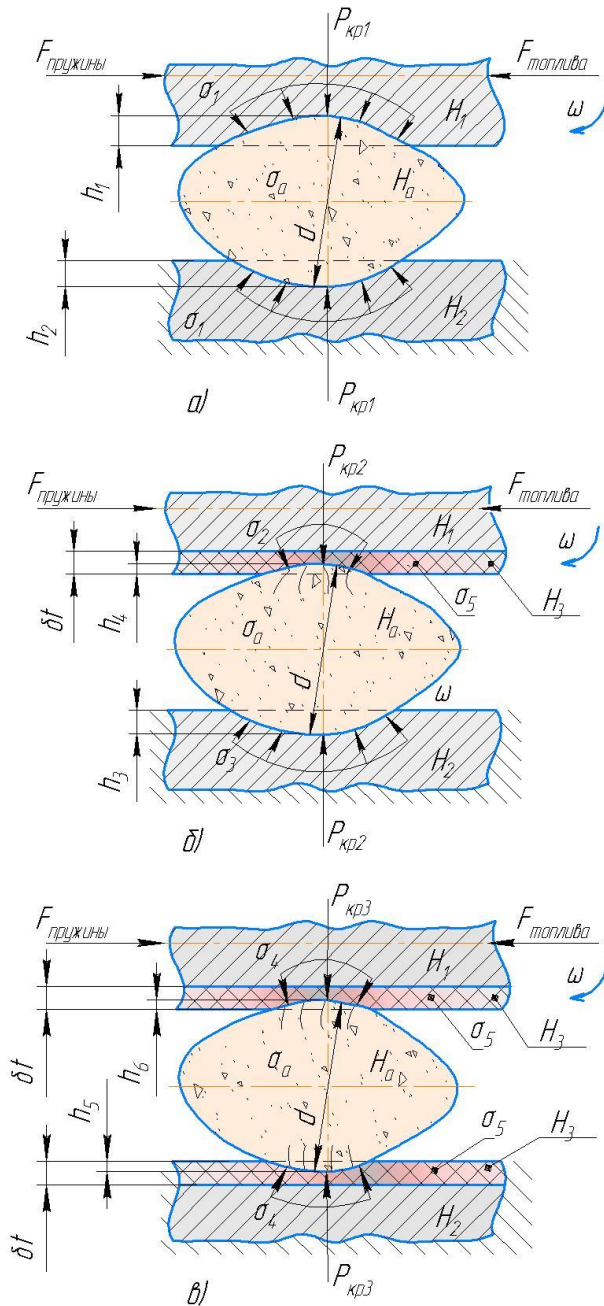
результата, максимально приближенного к реальным условиям эксплуатации [149]. Однако наличие большого количества исследований не позволяют полностью использовать накопленные материалы, ввиду широкой их направленности и узкой специфики работы определенных узлов, в частности распылителя форсунки.

Абразив, попадающий в прецизионное сопряжение, оказывает двухстороннее изнашивающее влияние, что приводит к одновременному износу как иглы, так и корпуса распылителя форсунки. В процессе работы распылителя осуществляется абразивное изнашивание, которое происходит не только за счёт твёрдых частиц абразива, поступающих в зону трения из внешней среды с потоком топлива, но и за счёт частиц металла, отделившихся от поверхностей деталей. При защемлении частицы абразива между иглой и корпусом мгновенно возникают напряжения сжатия, и поскольку игла в процессе работы ДВС совершает возвратно-поступательные, колебательные и вращательные движения, то частица либо внедряется в сжимающие поверхности и производит микрорезание металла деталей, либо разрушается. Кроме того, такое движение иглы и поток топлива распределяет мелкие разрушенные частицы абразива по всей прецизионной поверхности распылителя, что может стать причиной заклинивания её при достаточном их количестве. Таким образом, изменение прецизионной поверхности происходит постепенно, разрушение частиц мгновенно.

Модель взаимодействия абразивных частиц с поверхностями трения показана на рисунке 2.2, в которой изображены схемы внедрения абразивного зерна между деталями корпуса и иглы распылителя форсунки в направляющей части. В отличие от работы [102], рассмотрены условия комплектации прецизионного сопряжения обоими упрочнёнными деталями.

Модель показывает три варианта комплектации распылителей деталями. Вариант (а) предусматривает использование серийных распылителей без упрочняющего покрытия. Характер износа иглы и корпуса схож, так как они имеют приближенную друг к другу микротвёрдость, соответственно $H_1 \approx 7850$ МПа и $H_2 \approx 7350$ МПа. Вариант (б) предусматривает комплектацию распылителя, где на одну из деталей нанесён упрочняющий слой карбида хрома микротвёрдостью H_3 .

Вариант (в) предусматривает комплектацию, в которой обе детали содержат упрочняющий слой H_3 .



$F_{пружины}$, $F_{топлива}$ – сила, приводящая в движение иглу распылителя, Н

ω – угловая скорость, c^{-1}

$P_{кр1,2,3}$ – нагрузка на абразив, Н

$H_{1,2}$ – микротвердость деталей, МПа

H_3 – микротвердость покрытия, МПа

H_a – микротвердость абразива, МПа

d – размер абразива, мкм

σ_{1-4} – напряжение в деталях, МПа

σ_5 – напряжение в покрытии, МПа

σ_a – напряжение в абразиве, МПа

δt – толщина покрытия, мкм

h_{1-6} – глубина отпечатка после разрушения абразива, мкм

а) – Взаимодействие абразива между неупрочненными поверхностями деталей

б) – Взаимодействие абразива с рабочими поверхностями при упрочнении одной детали

в) – Взаимодействие абразива с рабочими поверхностями при упрочнении двух деталей

Рисунок 2.2 – Схема нагружения в соединении «деталь-абразив-деталь».

Комплектация распылителя по варианту *A* приводит к частым отказам распылителей форсунок в результате микрорезания и пластической деформации сопрягаемых поверхностей абразивом. Наиболее подробно износ и причины его возникновения со следствием рассмотрены в первой главе.

Комплектация распылителя по варианту *B* приводит к увеличению ресурса сопряжения в 1,7 раза [86, 102]. Однако, одна из деталей остается неупрочнённой, и при наличии в зоне трения абразивных частиц, аналогично варианту *A*, происходит её изнашивание. Ремонт по выработке ресурса упрочнённых деталей возможен с помощью перекомплектовки или наличия специализированного оборудования.

Комплектация распылителя по варианту *B* приводит к значительному увеличению ресурса распылителей форсунок и, в тоже время, позволяет снизить требования к системе очистки топлива. Абразивные частицы, попадающие в зазор, не вызывают деформации прецизионных поверхностей. В работах [4, 41, 165, 173] установлено, что покрытия, обладающие высокой микротвёрдостью, подвержены усталостному и энергетическому виду изнашивания, который характеризуется шелушением микрообъёмов износостойкого слоя и вызывается интенсивностью дробления абразива. Несмотря на это, упрочнять поверхности деталей машин износостойкими покрытиями экономически целесообразно, так как снижаются затраты на обслуживание дизелей и увеличивается безотказность ТА.

Таким образом, механизм повреждения поверхности при ударно-абразивном изнашивании включает в себя два процесса: дробление абразивных частиц и разрушение поверхностей сопряжения в локальных точках.

Определить способность абразивных частиц внедряться в поверхностный слой деталей возможно по критерию оценки перехода от прямого разрушения деталей к многоциклового [102, 134, 155, 181, 215]:

$$K_T = \frac{H_M}{H_a} \quad (2.18)$$

где H_m и H_a – микротвёрдость поверхности детали и абразива, МПа; K_T – критерий оценки разрушения поверхности деталей при $K_T < 0,5$ – прямое разрушение материала детали, $K_T = 0,5 \dots 0,7$ – граница перехода деформаций и $K_T > 0,7$ – многоцикловое изнашивание. Исходя из этого, чем больше коэффициент K_T , тем более стойкая металлическая поверхность к разрушению.

Согласно уравнению 2.18, минимальная микротвёрдость поверхности распылителя в условиях многоциклового изнашивания должна быть не менее:

$$H_m \geq 0,7H_a \quad (2.19)$$

Разрушение абразивной частицы в зоне контакта обеспечивается приложенной к ней нагрузкой, а разрушение поверхности деталей зависит от физико-механических свойств, применяемых материалов и технологий при упрочнении поверхности. Следовательно, граничное условие, предопределяющее разрушение абразива и поверхности, согласно уравнению 2.18, будет определяться следующей зависимостью [4, 98]:

$$\frac{H_m}{H_a} = \frac{P_m}{P_a} \quad (2.20)$$

где P_m и P_a – критическая нагрузка к моменту разрушения, соответственно детали и абразива, Н.

Условие прочности, при котором происходит разрушение абразивного зерна и деформация поверхности деталей [98, 102, 161, 173]:

$$\sigma_{max} = \frac{P_a}{S} = \frac{3P_a}{2\pi d^2} \geq [\sigma_a] \quad (2.21)$$

где σ_{max} – наибольшее по абсолютному значению нормальное напряжение в стали в момент начала разрушения абразива, МПа; S – площадь контакта, мм²; d – диаметр абразивной частицы, мм; $[\sigma_a]$ – предел прочности абразивной частицы, МПа.

Согласно условию 2.21, разрушение абразивной частицы при сжатии направляющими распылителя обеспечивается за счёт достижения определенной

площади контакта, который обеспечивает достаточную нагрузку для её разрушения. Исходя из этого при комплектации распылителя одной упрочнённой деталью, вторая будет претерпевать большую деформацию поверхности, вариант *Б* (рисунок 2.2), чем при комплектации серийными по варианту *А* (рисунок 2.2). Обратная составляющая условия 2.21, с увеличением прочности поверхности детали уменьшается площадь контакта, задействованного при разрушении абразивной частицы, что соответствует условию 2.20.

Из условия уравнения 2.21 следует, что предел прочности абразивной частицы прямопропорционален критической силе разрушения поверхности деталей.

Критическая сила разрушения абразивной частицы может быть определена следующим выражением [98, 102, 134, 173, 200, 215, 225]:

$$P_a = \pi \cdot R^2 \cdot [\sigma_a] \quad (2.22)$$

Граничное условие начала разрушения стальной поверхности, при котором начинается продавливание металла деталей, определяется критической силой и определяется выражением [5, 41, 98, 200]:

$$P_M = \frac{8 \cdot G \cdot a^3}{3 \cdot R} \quad (2.23)$$

где G – модуль сдвига, МПа; a – радиус контакта абразивной частицы с поверхностью при разрушении, мм; R – радиус абразивной частицы, мм.

Модуль сдвига для изотропных материалов определяется по следующему выражению [18, 30, 98, 102, 166, 200]:

$$G = \frac{E_c}{2 \cdot (1 + \mu_2)} \quad (2.24)$$

для упрочнённых деталей:

$$G = \frac{E_{\text{пр}}}{2 \cdot (1 + \mu_2)} \quad (2.25)$$

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{п}} \cdot (1 - \mu_3)}{(1 - 2\mu_2) \cdot (1 + \mu_1)} \quad (2.26)$$

где E_c и $E_{пр}$ – соответственно модуль упругости стали и приведенный для стали и покрытия, МПа; μ_1, μ_2, μ_3 - коэффициент Пуассона, соответственно абразивной частицы, покрытия и подложки (для стали и карбида хрома – 0,3; кварц – 0,07; корунд – 0,4).

Радиус отпечатка абразивной частицы после её разрушения на поверхности детали возможно определить из частного случая задачи Герца при контакте сферического индентера радиусом R с упругим полупространством при действии силы равной разрушению абразивной частицы, тогда [173]:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P_a(1-\mu_2^2)R}{4E}} \quad (2.27)$$

Если твёрдость поверхностей деталей, между которыми сжимается частица одинакова, то отношение глубины внедрения абразива в поверхность к его радиусу равно (рисунок 2.2) [102, 200]:

$$\frac{h}{R} = \frac{[\sigma_a]}{2H_M} \quad (2.28)$$

Следовательно, глубина внедрения абразива в поверхность одной детали:

$$h = \frac{R[\sigma_a]}{H_M} \quad (2.29)$$

Глубина внедрения абразивной частицы в поверхность детали стремится к минимуму $h \rightarrow 0$ при обеспечении достаточного уровня её микротвёрдости, что определяет многоцикловое изнашивание, тогда:

$$h = \frac{R[\sigma_a]}{0,7H_a} \quad (2.30)$$

Критическую толщину покрытия, позволяющую обеспечить прочность, при разрушении абразивной частицы возможно определить, согласно рисунку 2.2 вариант В, следующей формулой [173, 200]:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot R \cdot P_a \cdot \gamma^3 \cdot (1 - \mu_2)}{4 \cdot E_{пр}}} \quad (2.31)$$

где γ – отношение глубины внедрения абразивной частицы к радиусу отпечатка $\gamma = h/a$.

Из вышележащих формул следует, что чем больше диаметр абразивной частицы и меньше микротвёрдость покрытия, тем больше должна быть толщина износостойкого слоя для обеспечения несущей его способности.

В целях обеспечения надёжности получаемого покрытия при прогнозировании, установлению его оптимальных физико-механических свойств и выбора режима металлизации нами впервые рассмотрен вопрос по определению его критической толщины в зависимости от микротвёрдости упрочняющего слоя, физико-механических свойств абразивной частицы и её диаметра. На основании формул 2.22, 2.26, 2.27, 2.29, 2.30 и 2.31 получена новая формула, определяющая критическую толщину покрытия, которая имеет вид:

$$h_{кр} = f(H_M, R) = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot R \cdot P_a \cdot \left(\frac{R[\sigma_a]}{H_M} \right)^3 \cdot (1 - \mu_2)}{4 \cdot E_{пр}}} \quad (2.32)$$

Проведя преобразования уравнения 2.32, получим:

$$h_{кр} = f(H_M, R) = R[\sigma_a] \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{H_M^3 \cdot (1 + \mu_2)}} = \frac{R[\sigma_a]}{H_M \cdot \sqrt[3]{(1 + \mu_2)}}$$

Переписав уравнение, формула определения критической толщины покрытия в зависимости от его микротвёрдости и размера абразивной частицы, будет иметь следующий вид:

$$h_{кр} = f(H_M, R) = \frac{R[\sigma_a]}{H_M \cdot \sqrt[3]{(1 + \mu_2)}} \quad (2.33)$$

Определение критической толщины покрытия оптимально в случае упрочнения новых деталей, так как наносить значительную толщину износостойкого слоя экономически нецелесообразно.

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует, что неупрочнённые поверхности деталей выдерживают меньшие значения контактных напряжений, возникающих при защемлении абразива, чем упрочнённые $\sigma_4 \gg \sigma_1$.

Глубина внедрения абразивной частицы в поверхность деталей различна: $h_3 > h_1 \approx h_2 > h_4 \geq h_5 \approx h_6$, и следовательно площадь контакта абразивной частицы с поверхностями: $S_3 > S_1 \approx S_2 > S_4 \geq S_5 \approx S_6$ [137].

Уменьшение глубины внедрения абразивной частицы и площади контакта в упрочнённую поверхность детали по вариантам рисунка 2.2 *Б* и *В*, в сравнении с такой же поверхностью по варианту *А*, связано с уменьшением критической нагрузки, действующей на упрочнённую поверхность, так как при сжатии менее твёрдая поверхность претерпевает большую деформацию, образуя пятно контакта с большей площадью и глубиной внедрения.

Для обеспечения стабильности размеров направляющих и увеличения надёжности распылителей форсунок оптимально наносить износостойкое покрытие на обе его детали (рисунок 2.2 вариант *В*), так как это приводит к снижению удельной нагрузки на поверхности направляющей части иглы и корпуса $P_{M1} > P_{M2} > P_{M3}$, что обеспечивает увеличение наработки сопряжения при дроблении абразивных частиц.

Произведём расчёт на примере восстановления и упрочнения изношенных деталей распылителя форсунки 261.1112010-11, применяемой для механической топливной системы, производства ЯЗДА.

Расчёт по абразивному изнашиванию рационально осуществлять по наиболее крепким составляющим пыли – это кварц и корунд, микротвёрдость которых представлена в таблице 1.2. На основании данных таблицы 1.2 и формулы 2.18 в таблице 2.5 показан результат расчёта критерия оценки внедрения абразивных частиц в поверхность серийных деталей распылителя.

Таблица 2.5 – Коэффициент K_T у изнашиваемых деталей распылителя форсунки.

Деталь	Материал	Микротвёрдость, МПа	Критерий оценки K_T	
			Кварц	Корунд
Корпус	12Х2Н4А	7350	0,65	0,31
Игла	Р6М5	7850	0,69	0,33

Наличие в топливе абразивных частиц кварца вызывает пластическую деформацию поверхностей направляющей распылителя, а корунда дополнительно к этому микрорезание металла вплоть до полного внедрения частицы в поверхность детали.

Минимальная микротвёрдость карбидохромового покрытия для обеспечения многоциклового изнашивания деталей, согласно условию 2.19, соответственно для кварца и корунда составит:

$$H_m \geq 0,7H_{a_{\text{кварц}}} = 0,7 \cdot 11300 = 7910 \text{ МПа.}$$

$$H_m \geq 0,7H_{a_{\text{корунд}}} = 0,7 \cdot 24000 = 16800 \text{ МПа.}$$

Результаты расчёта показывают, что серийные детали распылителя претерпевают микрорезание металла и пластическую деформацию при контактно-абразивном изнашивании по причине низкой микротвёрдости рабочих поверхностей. Минимальная микротвёрдость поверхности для разрушения частиц корунда должна быть в 2,14 раза больше. Кроме того, минимальная микротвёрдость подтверждается теорией исследователей [27, 104, 118, 153, 166, 225].

В основном в топливе находятся абразивные частицы диаметром до 3х мкм, тогда критическая сила разрушения частиц кварца и корунда по уравнению 2.22 равна:

$$P_{a_{\text{кварц}}} = \pi \cdot R^2 \cdot [\sigma_{a_{\text{кварц}}}] = 3,14 \cdot 0,0015^2 \cdot 400 = 2,83 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

$$P_{a_{\text{корунд}}} = \pi \cdot R^2 \cdot [\sigma_{a_{\text{корунд}}}] = 3,14 \cdot 0,0015^2 \cdot 1000 = 7,07 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

Следовательно, для разрушения абразивной частицы корунда требуется обеспечить прочность поверхности в 2,54 раза выше, чем при кварце.

Глубина внедрения абразива в поверхность одной детали по уравнению 2.29 равна:

$$h_{\text{корпус}} = \frac{R[\sigma_{\text{кварц}}]}{H_{\text{корпус}}} = \frac{0,0015 \cdot 400}{7350} = 8,16 \cdot 10^{-5} \text{ мм}.$$

$$h_{\text{игла}} = \frac{R[\sigma_{\text{кварц}}]}{H_{\text{игла}}} = \frac{0,0015 \cdot 400}{7850} = 7,64 \cdot 10^{-5} \text{ мм}.$$

$$h_{\text{корпус}} = \frac{R[\sigma_{\text{корунд}}]}{H_{\text{корпус}}} = \frac{0,0015 \cdot 1000}{7350} = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

$$h_{\text{игла}} = \frac{R[\sigma_{\text{корунд}}]}{H_{\text{игла}}} = \frac{0,0015 \cdot 1000}{7850} = 1,91 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

В условиях упрочнения поверхностей карбидохромовым покрытием микротвёрдостью не менее 16800 МПа, глубина внедрения абразивных частиц по уравнению 2.30 составит:

$$h_{\text{Cr}_2\text{C}_3} = \frac{R[\sigma_{\text{кварц}}]}{H_{\text{Cr}_2\text{C}_3}} = \frac{0,0015 \cdot 400}{16800} = 3,57 \cdot 10^{-5} \text{ мм}.$$

$$h_{\text{Cr}_2\text{C}_3} = \frac{R[\sigma_{\text{корунд}}]}{H_{\text{Cr}_2\text{C}_3}} = \frac{0,0015 \cdot 1000}{16800} = 8,93 \cdot 10^{-5} \text{ мм}.$$

Радиус отпечатка абразивной частицы после её разрушения на поверхности детали по уравнению 2.27:

$$a_{\text{Кварц}}^{\text{Серийные}} = \sqrt[3]{\frac{3P_a(1-\mu_2^2)R}{4E}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot (1-0,3^2) \cdot 0,0015}{4 \cdot 210000}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

$$a_{\text{Корунд}}^{\text{Серийные}} = \sqrt[3]{\frac{3P_a(1-\mu_2^2)R}{4E}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 7,07 \cdot 10^{-3} \cdot (1-0,3^2) \cdot 0,0015}{4 \cdot 210000}} = 3,25 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

$$a_{\text{Кварц}}^{\text{Упрочнённые}} = \sqrt[3]{\frac{3P_a(1-\mu_2^2)R}{4E_{\text{пр}}}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot (1-0,3^2) \cdot 0,0015}{4 \cdot 605140}} = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

$$a_{\text{Корунд}}^{\text{Упрочнённые}} = \sqrt[3]{\frac{3P_a(1-\mu_2^2)R}{4E_{\text{пр}}}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 7,07 \cdot 10^{-3} \cdot (1-0,3^2) \cdot 0,0015}{4 \cdot 462500}} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

Следовательно, с увеличением микротвёрдости деталей снижается глубина и радиус внедрения абразивных частиц в их поверхности.

Приведённый модуль упругости упрочнённых деталей в соответствии с уравнением 2.26:

$$E_{\text{пркварц}} = \frac{E_{\text{п}} \cdot (1 - \mu_3)}{(1 - 2\mu_2) \cdot (1 + \mu_1)} = \frac{370000 \cdot (1 - 0,3)}{(1 - 2 \cdot 0,3) \cdot (1 + 0,07)} = 605140 \text{ МПа.}$$

$$E_{\text{пркорунд}} = \frac{E_{\text{п}} \cdot (1 - \mu_3)}{(1 - 2\mu_2) \cdot (1 + \mu_1)} = \frac{370000 \cdot (1 - 0,3)}{(1 - 2 \cdot 0,3) \cdot (1 + 0,4)} = 462500 \text{ МПа.}$$

Критическая толщина карбидохромового покрытия для частиц абразива диаметром 3 мкм, согласно уравнению 2.33, равна:

$$h_{\text{Кварц}}^{\text{Упрочнённые}} = \frac{R[\sigma_a]}{H_{\text{м}} \cdot \sqrt[3]{(1 + \mu_2)}} = \frac{0,0015 \cdot 400}{16800 \cdot \sqrt[3]{(1 + 0,3)}} = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ мм} = 0,033 \text{ мкм.}$$

$$h_{\text{Корунд}}^{\text{Упрочнённые}} = \frac{R[\sigma_a]}{H_{\text{м}} \cdot \sqrt[3]{(1 + \mu_2)}} = \frac{0,0015 \cdot 1000}{16800 \cdot \sqrt[3]{(1 + 0,3)}} = 8,2 \cdot 10^{-5} \text{ мм} = 0,082 \text{ мкм.}$$

Следовательно, при микротвёрдости карбидохромового покрытия 16800 МПа и диаметре абразивной частицы корунда 3 мкм, критическая толщина покрытия должна быть не менее 0,082 мкм.

На рисунке 2.3 представлен график зависимости критической толщины покрытия при его микротвёрдости 16,8 ГПа и силы разрушения абразивных частиц корунда и кварца от их диаметра. Из рисунка 2.3 следует: с увеличением диаметра абразива увеличивается сила его разрушения по экспоненциальной зависимости, а критическая толщина увеличивается линейно.

На рисунке 2.4 представлена функция определения критической толщины покрытия в зависимости от его микротвёрдости при максимальном диаметре абразивного зерна 3 мкм, согласно уравнению 2.33, соответственно для кварца и корунда.

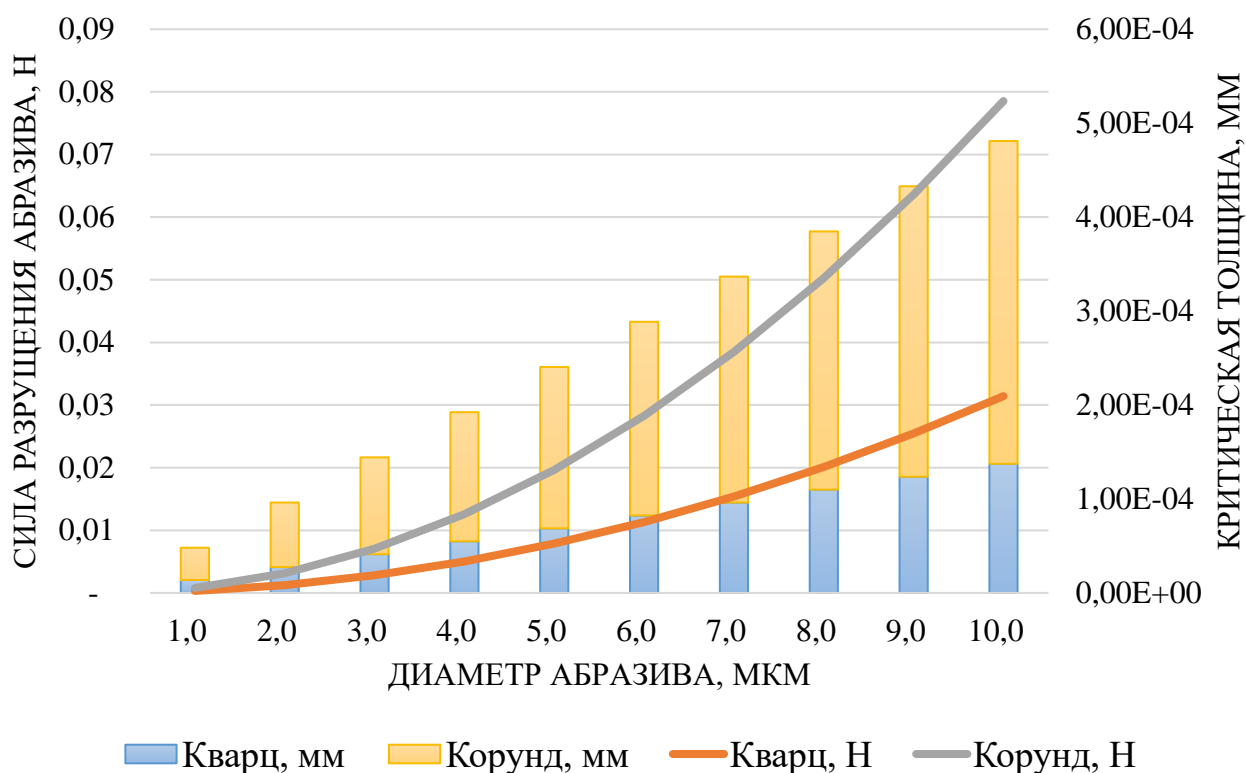


Рисунок 2.3 – Зависимость изменения силы разрушения абразивной частицы и критической толщины карбидохромового покрытия от диаметра абразива.

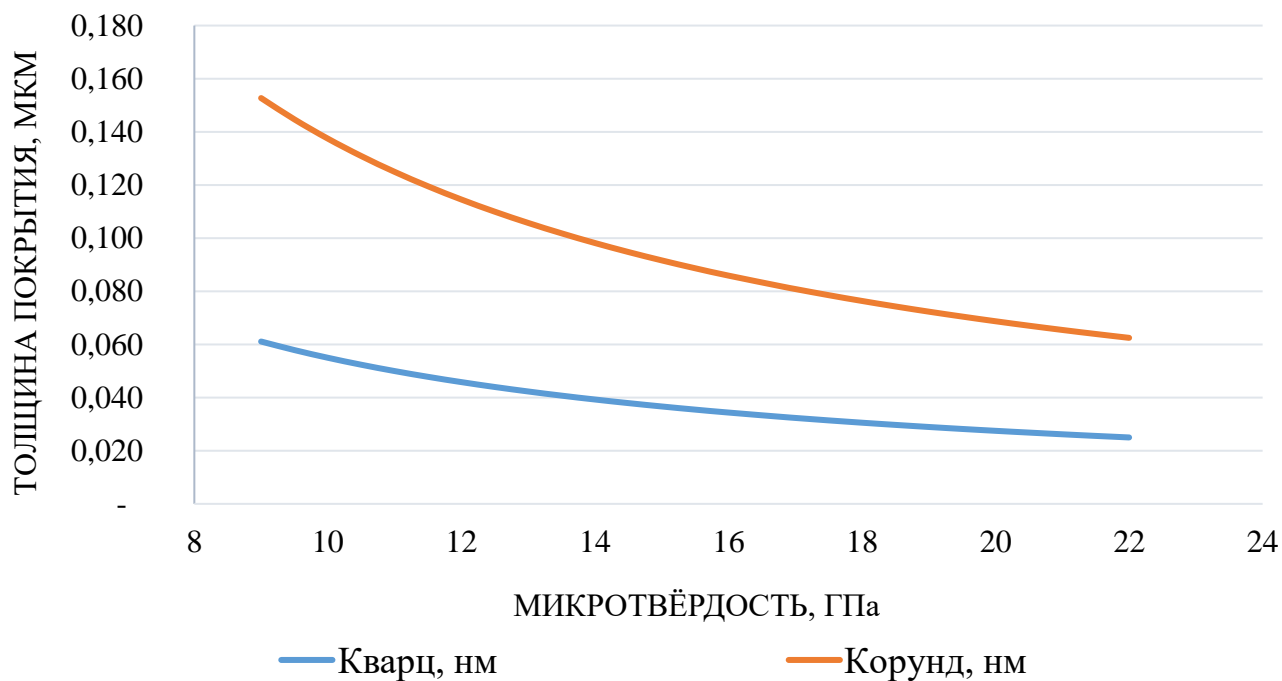


Рисунок 2.4 – Зависимость изменения критической толщины от микротвёрдости покрытия.

Установлены уравнения регрессии и построены графики функции отклика (рисунок 2.5 и 2.6), определяющие критическую толщину покрытия на стальной поверхности в зависимости от его микротвёрдости и диаметра частицы кварца и корунда, которые описываются следующими формулами:

$$h_{\text{Кварц}}^{\text{Упрочнённые}} = 0,18 - 2,55 \cdot 10^{-5} H_M + 0,026R + 8,21 \cdot 10^{-10} \cdot H_M^2 - 8,63 \cdot 10^{-7} \cdot H_M R - 17R^2 \quad (2.34)$$

$$h_{\text{Корунд}}^{\text{Упрочнённые}} = 0,46 - 6,55 \cdot 10^{-5} H_M + 0,065R + 2,05 \cdot 10^{-9} \cdot H_M^2 - 2,16 \cdot 10^{-6} \cdot H_M R - 6,92 \cdot 10^{-17} R^2 \quad (2.35)$$

Исходя из вышеизложенного, подтверждается теория изнашивания при контактно-абразивном взаимодействии, и минимальная микротвёрдость карбидохромового покрытия на деталях распылителя форсунки в условиях многоциклового изнашивания должна быть не менее 16,8 ГПа.

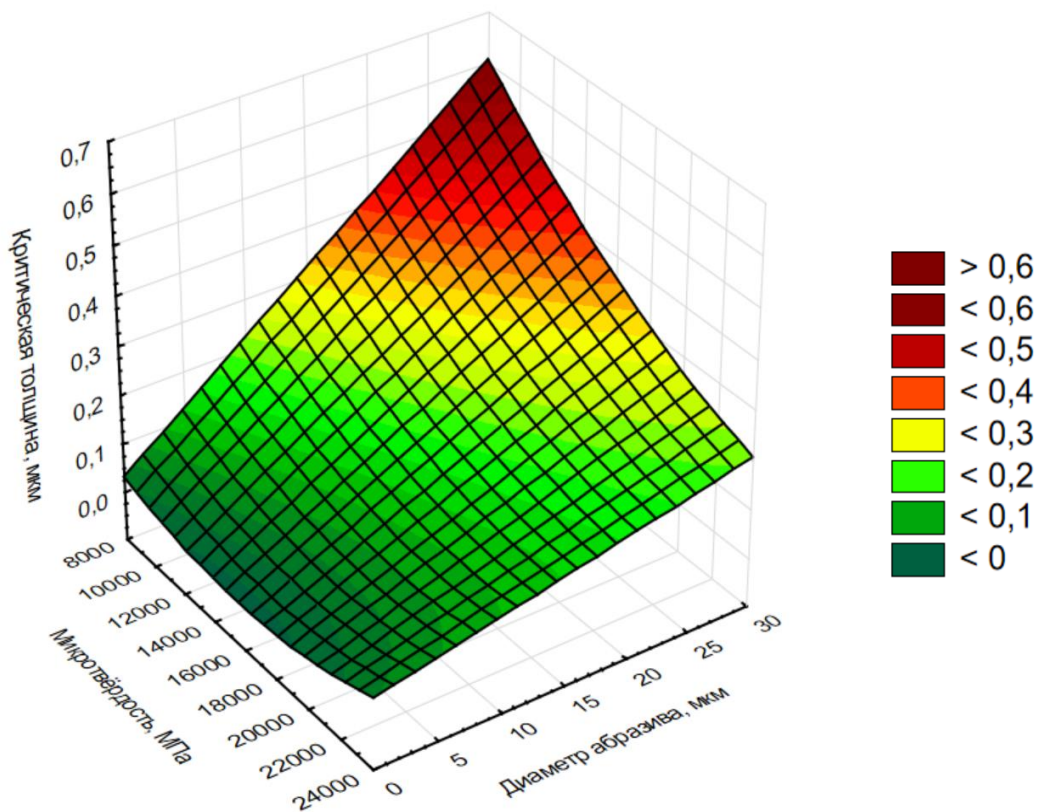


Рисунок 2.5. Функция отклика изменения критической толщины покрытия в зависимости от его микротвёрдости и диаметра частицы кварца.

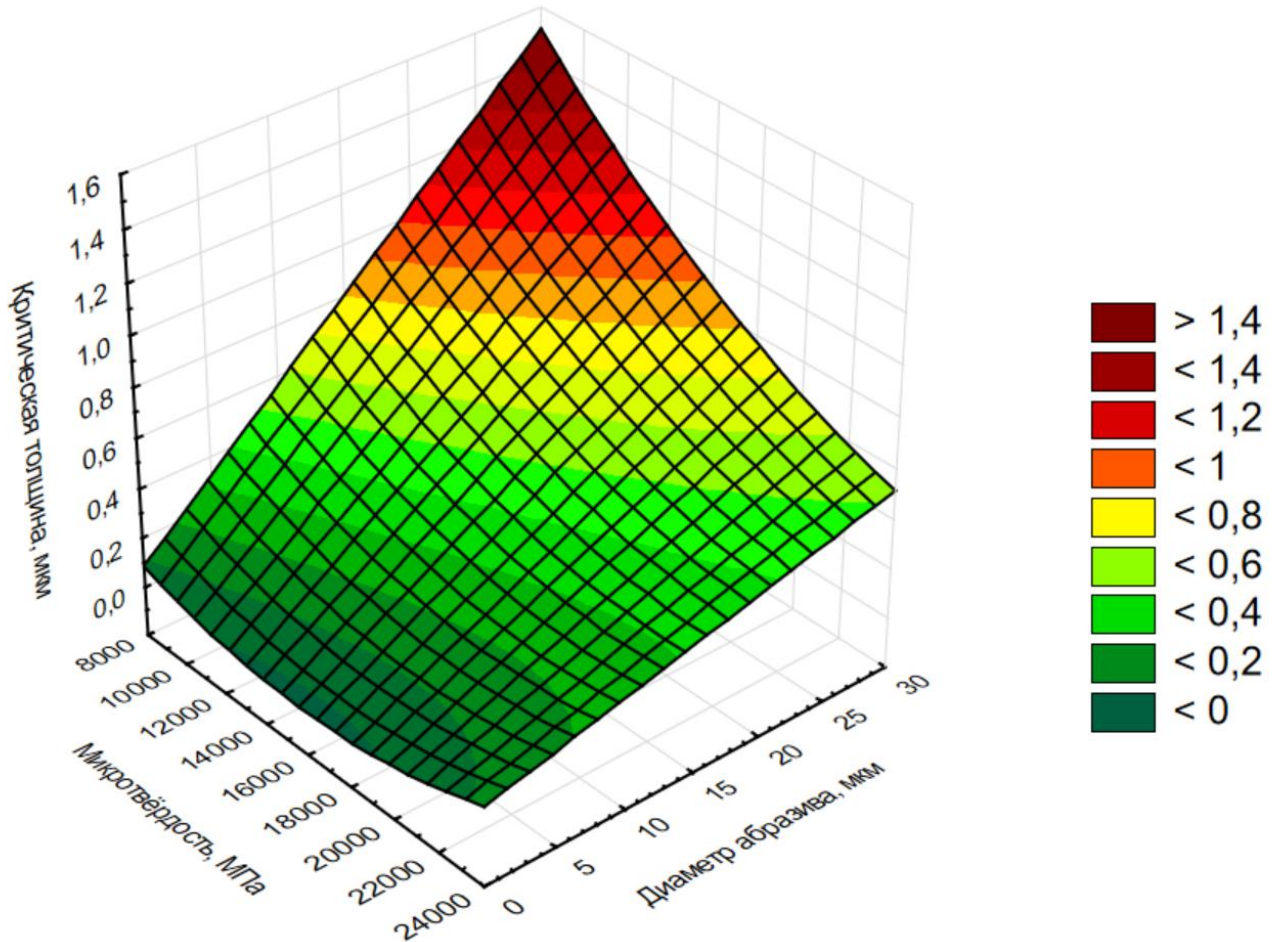


Рисунок 2.6. Функция отклика изменения критической толщины покрытия в зависимости от его микротвёрдости и диаметра частицы корунда.

Таким образом, увеличить наработку распылителей возможно путём упрочнения обеих деталей износостойкими покрытиями. Критическая толщина карбидохромового покрытия при микротвёрдости 16,8 ГПа и диаметре абразивной частицы корунда 3 мкм должна быть не менее 0,082 мкм. Установлена формула по определению критической толщины покрытий в зависимости от значений микротвёрдости и диаметра абразивного зерна. Расчёт критической толщины покрытия осуществлён в условиях нормального нагружения. При эксплуатации упрочнённых распылителей форсунок на абразив, в момент его защемления и разрушения, будут действовать также и касательные силы, которые обеспечат снижение нагрузки на несущую систему «деталь-покрытие» путём разрушения абразивного зерна при меньшей нагрузке.

2.3. Определение необходимой толщины карбидохромового покрытия, обеспечивающей восстановление ремфонда распылителей в полном объёме

Восстанавливать изношенные поверхности деталей машин экономически целесообразно, так как затраты на новые запасные части составляют до 70% в себестоимости ремонта техники. Себестоимость восстановления деталей ниже на 25...45% от стоимости новых.

К восстановлению распылителей форсунок пригодны до 90% ремфонда, а остальные 10% выбраковываются по причине невозможности восстановления [20, 146, 154]. По данным таблицы 1.5 износ направляющей распылителя – 70 мкм, запорного конуса – 20 мкм, а распыляющих отверстий – 78 мкм (рисунок 2.7).

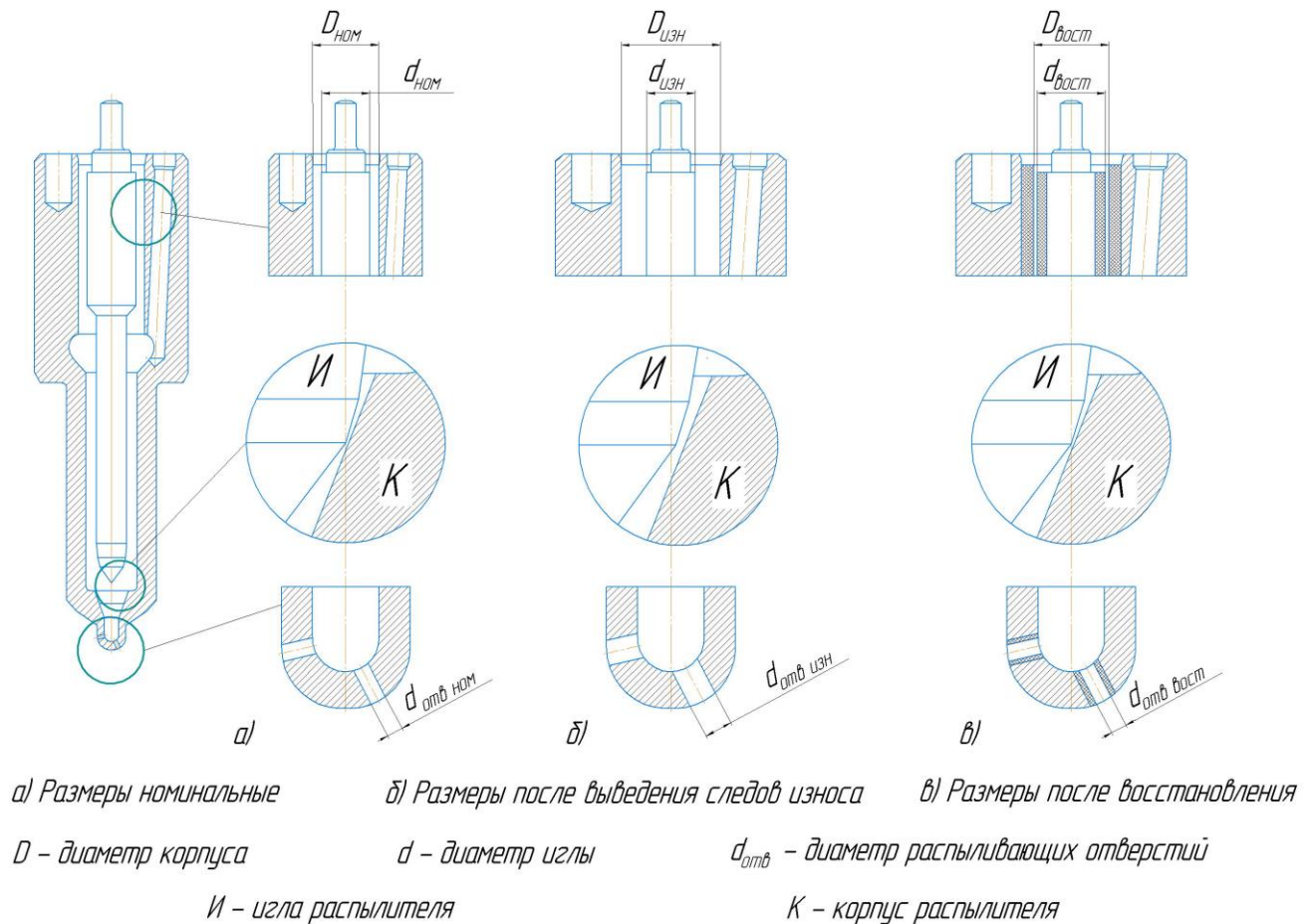


Рисунок 2.7 – Схема геометрических размеров деталей распылителя форсунки:

а – распылитель серийный; б – распылитель изношенный;

в – распылитель восстановленный.

При восстановлении направляющей распылителя форсунки необходимо обеспечить зазор между иглой и корпусом распылителя 2...4 мкм, несущую способность системы «деталь-покрытие», высокую сцепляемость и равномерную толщину покрытия. Этим требованиям возможно достичь с помощью специальной подготовки поверхностей к восстановлению геометрических размеров, которая заключается в выведении следов износа путём применения технологических операций хонингования для направляющей корпуса и точения или шлифования для иглы распылителя станками типа [210] с последующим полированием и очисткой поверхностей.

Недостатком механической обработки является неравномерность выведения следов износа, в результате которой на обрабатываемой поверхности детали образуются дефекты в виде овальности, цилиндричности и корсетности. В целях получения на этих поверхностях упрочняющего покрытия с высоким классом шероховатости припуск на механическую обработку с учётом технологичности, компенсации износа и дефектов должен быть 50 мкм на диаметр.

Для обеспечения достаточного уровня сцепляемости покрытия с подложкой и экономической целесообразности технологического процесса восстановления распылителя форсунки чистота его рабочих поверхностей перед осаждением упрочняющего покрытия должна соответствовать шероховатости Ra0,2 мкм [230], что возможно получить после механической обработки с полированием. Особенность полирования – это притупление острых кромок микронеровностей поверхностей деталей, которые могут являться центрами напряжений и приводить к разрушению покрытия при контактном нагружении. В процессе осаждения покрытия происходит заполнение микронеровностей карбидом хрома. В результате получается поверхность с шероховатостью Ra0,05 мкм.

Для обеспечения и увеличения возможности комплектации распылителей упрочнёнными деталями с исключением повторного осаждения толщина покрытия должна позволять осуществлять перешлифовку деталей в ремонтные группы, что требует дополнительный припуск не менее 5 мкм на диаметр. Разрабатываемая технология, согласно параграфа 2.1 настоящей главы, в отличие от ранее

исследованных работ [14, 20, 21, 25, 97, 98, 99, 100, 101, 102] и другие, предусматривает получение покрытия без прогиба деталей.

В соответствии с рисунком 2.7 для восстановления направляющей распылителя форсунки необходимая толщина карбидохромового покрытия на диаметр одной детали будет определяться уравнением:

$$h_{\text{п}} = h_{\text{детали}} \quad (2.36)$$

где $h_{\text{детали}}$ – толщина карбидохромового покрытия, мм.

На направляющих поверхностях иглы и корпуса распылителя необходимо наносить покрытие одинаковой толщины:

$$h = h_{\text{игла}} = h_{\text{корпус}} = \frac{1}{2} h_{\text{общ}} \quad (2.37)$$

где $h_{\text{игла}}$ и $h_{\text{корпус}}$ – толщина покрытия, соответственно на игле и корпусе в направляющей части распылителя, мм; $h_{\text{общ}}$ – совокупная толщина покрытия в направляющей части распылителя, мм.

Таким образом, в данной работе предлагаются формулы 2.38, 2.39 и 2.40 для определения толщины карбидохромового покрытия на каждую деталь распылителя, обеспечивающего восстановление ремфонда в полном объеме:

$$h = \frac{(D_{\text{н.и}} - d_{\text{и.и}}) + (d_{\text{и.к}} - D_{\text{н.к}})}{2} + \text{П}_{\text{м}} + \text{П}_{\text{п.п}} + \text{П}_{\text{пш}} - \text{П}_{\text{д}} - \frac{1}{2} \text{Д} + \sum RZ_{i_{\text{д}}} + \sum RZ_{i_{\text{п}}} \quad (2.38)$$

где $D_{\text{н.и}}$, $D_{\text{н.к}}$ – номинальный диаметр иглы и корпуса распылителя, мм; $d_{\text{и.и}}$, $d_{\text{и.к}}$ – диаметр после выведения следов износа у иглы и корпуса распылителя, мм; $\text{П}_{\text{м}}$ – припуск на механическую обработку, мм; $\text{П}_{\text{п.п}}$ – припуск на полировку при подготовке поверхности к осаждению покрытия, мм; $\text{П}_{\text{пш}}$ – запас на припуск для перешлифовки в другие ремонтные группы, мм; $\text{П}_{\text{д}}$ – припуск на доводку при комплектовке, мм; Д – конструкторский допуск, зазор между иглой и корпусом распылителя, мм; $\sum RZ_{i_{\text{д}}}$ – высота микронеровностей, полученных при подготовке

стальной поверхности к осаждению покрытия, мм; $\sum Rz_{i_{\Pi}}$ – высота микронеровностей на полученном покрытии, мм.

При изготовлении новых деталей оптимальная толщина карбидохромового покрытия на направляющей распылителя должна быть:

$$h_{\text{опт}}^{\text{серийные}} = h_{\text{кр}} + \sum Rz_{i_{\text{д}}} + \sum Rz_{i_{\text{п}}} \quad (2.39)$$

Нанесение износостойкого слоя на запирающий конус нерационально, так как карбиды хрома хрупкие и могут привести к растрескиванию покрытия из-за характера работы распылителя. Поэтому запирающие конуса иглы и корпуса распылителя шлифуются и притираются.

Восстановление распыляющих отверстий с помощью зачеканки изношенных и рассверливанием рядом новых невозможно, так как имеется большая вероятность отрыва носика распылителя при эксплуатации. Поэтому распыляющие отверстия, как и направляющая распылителя, подлежат к выведению следов износа с последующим осаждением на них упрочняющего покрытия.

Толщина карбидохромового покрытия в распыляющих отверстиях будет определяться следующим уравнением:

$$h_{\mu_f} = \frac{(d_{\text{изн}} - d_{\text{ном}})}{2} + \Pi_{\text{м}} + \Pi_{\text{п.п}} + \sum Rz_{i_{\text{д}}} + \sum Rz_{i_{\text{п}}} \quad (2.40)$$

где $d_{\text{изн}}$, $d_{\text{ном}}$ – диаметр распыляющих отверстий соответственно изношенный и номинальный, мм.

Проведём расчёт по определению необходимой толщины карбидохромового покрытия на изношенных деталях распылителя форсунки 261.1112010-11, применяемой на дизелях ЯМЗ-236/238 [7, 171, 172].

Согласно вышеизложенным данным для восстановления работоспособности распылителя форсунки в направляющей части в соответствии с уравнением 2.38 толщина карбидохромового покрытия на одну деталь должна быть:

$$\begin{aligned}
 h_{\text{игла}} &= \frac{(D_{\text{н.и}} - d_{\text{и.и}}) + (d_{\text{и.к}} - D_{\text{н.к}})}{2} + \Pi_{\text{м}} + \Pi_{\text{п.п}} + \Pi_{\text{пш}} - \Pi_{\text{д}} - \frac{1}{2}D + \sum Rz_{i_{\text{д}}} + \sum Rz_{i_{\text{п}}} = \\
 &= \frac{(5,996 - 5,961) + (6,035 - 6,0)}{2} + 0,05 + 0,0005 + 0,005 - 0,001 - 0,5 \cdot 0,003 + \\
 &\quad 0,0002 + 0,00005 = 0,09125 \text{ мм} = 91,25 \text{ мкм}.
 \end{aligned}$$

Следовательно, для восстановления геометрических размеров иглы и корпуса распылителя в направляющей необходимо приращение их диаметральных размеров на 91,25 мкм, а на радиус 45,625 мкм.

В случае упрочнения серийных деталей при микротвёрдости покрытия 16,8ГПа и диаметре абразивной частицы корунда 3 мкм оптимальная толщина будет равна:

$$\begin{aligned}
 h_{\text{мин}}^{\text{серийные}} &= h_{\text{кр}} + \sum Rz_{i_{\text{д}}} + \sum Rz_{i_{\text{п}}} = 0,000082 + 0,0002 + 0,00005 = \\
 &\quad 0,000332 \text{ мм} = 0,332 \text{ мкм}.
 \end{aligned}$$

На восстановление распыляющих отверстий приращение толщины покрытия на радиус должно быть:

$$\begin{aligned}
 h_{\mu f} &= \frac{(d_{\text{изн}} - d_{\text{ном}})}{2} + \Pi_{\text{м}} + \Pi_{\text{п.п}} + \sum Rz_{i_{\text{д}}} + \sum Rz_{i_{\text{п}}} = \frac{(0,418 - 0,34)}{2} + 0,1 + 0,0002 + \\
 &\quad 0,0002 + 0,00005 = 0,13945 \text{ мм} = 139,45 \text{ мкм}.
 \end{aligned}$$

Следовательно, для восстановления геометрических размеров распыляющих отверстий корпуса распылителя необходимо осаждать покрытие толщиной 139,45 мкм.

Таким образом, для восстановления ремфонда распылителей форсунок, необходимо обеспечить одновременный и равномерный рост толщины карбидохромового покрытия в направляющей распылителя 45,625 мкм, а в распыляющих отверстиях 139,45 мкм, что возможно обеспечить технологическим режимом работы CVD-установки. Разрабатываемая технология предусматривает получение покрытия без прогиба деталей.

2.4. Выводы

1. Предложена теория для расчёта термодинамической возможности протекания химических реакций в реакторе CVD-установки при температуре нагрева деталей ниже 200 °С.

2. Увеличение давления вакуума до 0,001 Па приводит к снижению температуры разложения гексакарбонила хрома с 191°С до 123°С, что смещает направление термодинамических реакций в сторону образования карбида хрома.

3. Установлена минимальная микротвёрдость карбидохромового покрытия на обеих деталях распылителя форсунки 16,8 ГПа, обеспечивающая полное разрушение абразива.

4. Несущая способность карбидохромового покрытия на деталях распылителя обеспечивается при толщине не менее 0,082 мкм.

5. Толщина карбидохромового покрытия, обеспечивающая восстановление ремфонда деталей распылителя в полном объёме, по предложенным расчётным формулам, должна составлять: по направляющим поверхностям 45,625 мкм, а в распыляющих отверстиях 139,45 мкм.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1. Программа проведения экспериментов

Программой исследований предусматривалось рассмотреть факторы, влияющие на осаждение карбидохромового покрытия при температуре ниже 200 °С, а также:

- разработать устройство для осаждения карбидохромового покрытия на внутренние труднодоступные поверхности корпуса распылителя форсунки;
- получить количественные и качественные характеристики покрытия;
- определить закономерности получения заданных физико-механических свойств карбидохромового покрытия;
- определить режимы восстановления распылителей форсунок дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома.

Последовательность решения задач, определённых целью исследования, приведена на рисунке 3.1.

3.2. Объект и предмет исследования

Объектом исследования является осаждение карбидохромового покрытия на стальные детали распылителей форсунок автотракторных дизелей.

Предметом исследования являются количественные и качественные характеристики карбидохромовых покрытий на труднодоступных рабочих поверхностях распылителей форсунок автотракторных дизелей, характеризующимися следующими параметрами:

- толщина;
- микротвёрдость;
- скорость осаждения;
- остаточные внутренние напряжения;
- сцепляемость покрытия с подложкой.

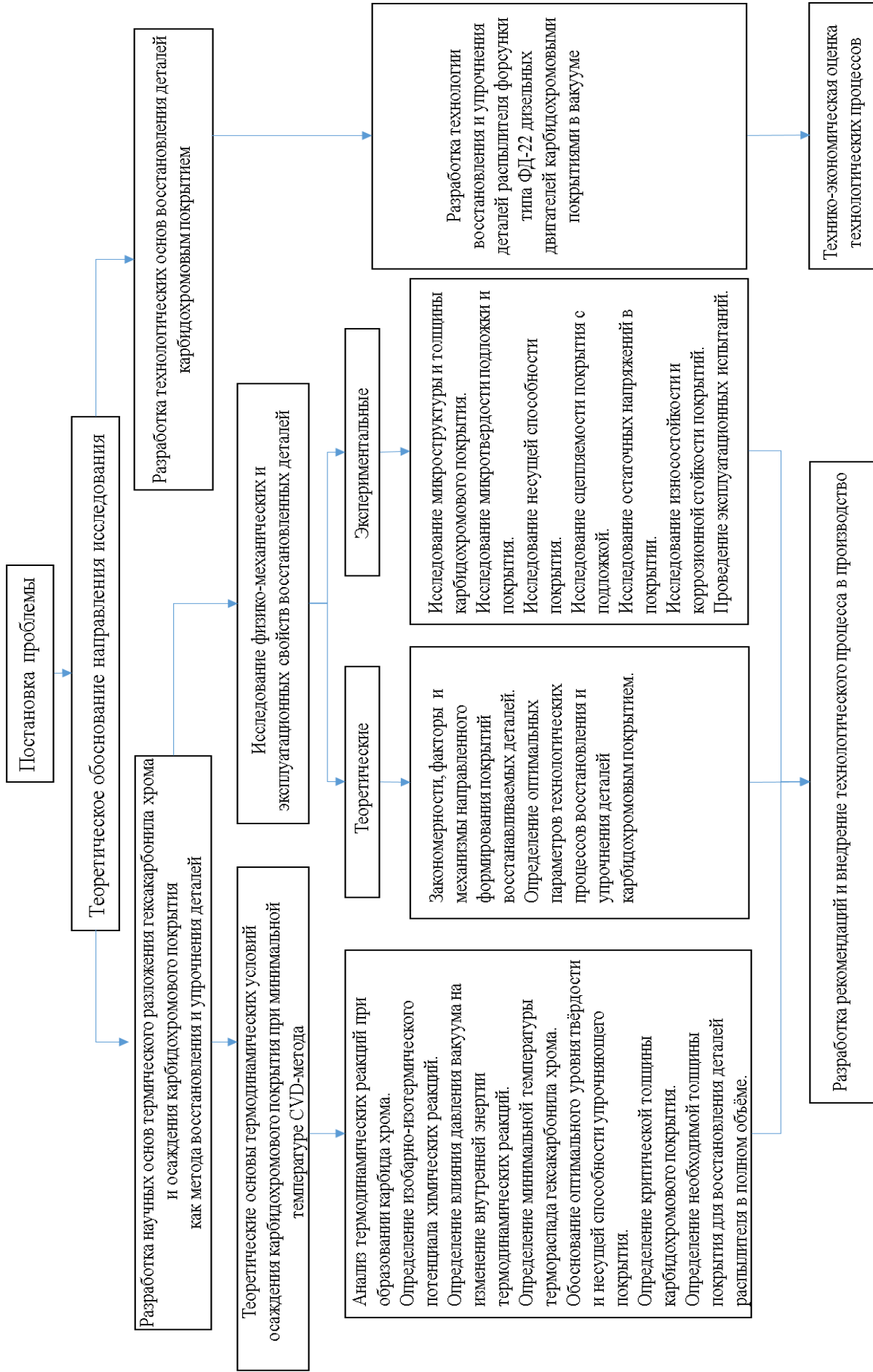
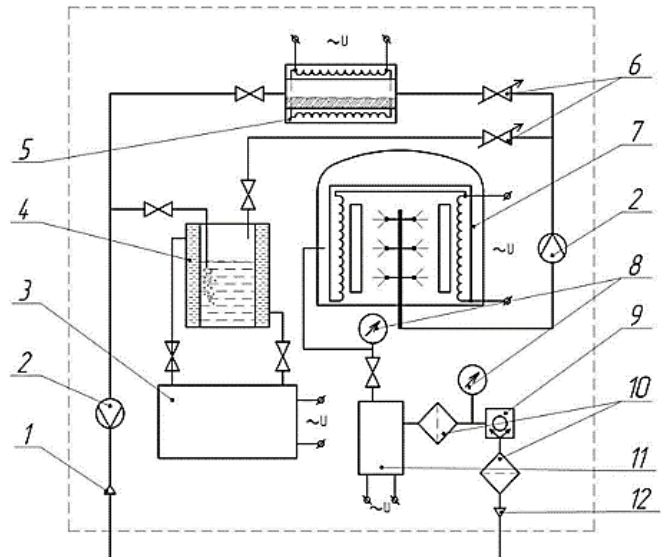


Рисунок 3.1 – Программа исследований.

3.3. Средства технологического оснащения процесса нанесения покрытий методом химической парофазной металлизации

Известно большое количество зарубежных и отечественных CVD-установок по нанесению износостойких покрытий на стальные детали: Easy Tube (США), SAMCO (Япония), VSE_PECVD_100 (Россия), МОСVD (Россия) и другие. Упрочняющие покрытия во всех случаях наносят из паровой фазы разложением карбониллов хрома, никеля, железа, вольфрама, ванадия, молибдена, кобальта и других металлоорганических соединений.

В данной работе для получения карбидохромового покрытия на иглах распылителей использовали CVD-установку [230], принципиальная схема которой представлена на рисунке 3.2.



- 1 – подвод инертного газа; 2 – расходомер; 3 – термостат; 4 – смеситель;
 5 – сублиматор; 6 – клапан регулировочный; 7 – реакционная камера;
 8 – вакуумметр; 9 – вакуум-насос; 10 – фильтрующий элемент;
 11 – печь доразложения; 12 – выпуск очищенного газа в атмосферу.

Рисунок 3.2 – Схема промышленной установки для нанесения покрытий CVD-методом МОС на внешние поверхности деталей машин.

Нанесение карбидохромовых покрытий на иглы распылителей осуществляется с помощью вращательного способа. Перемешивание пара

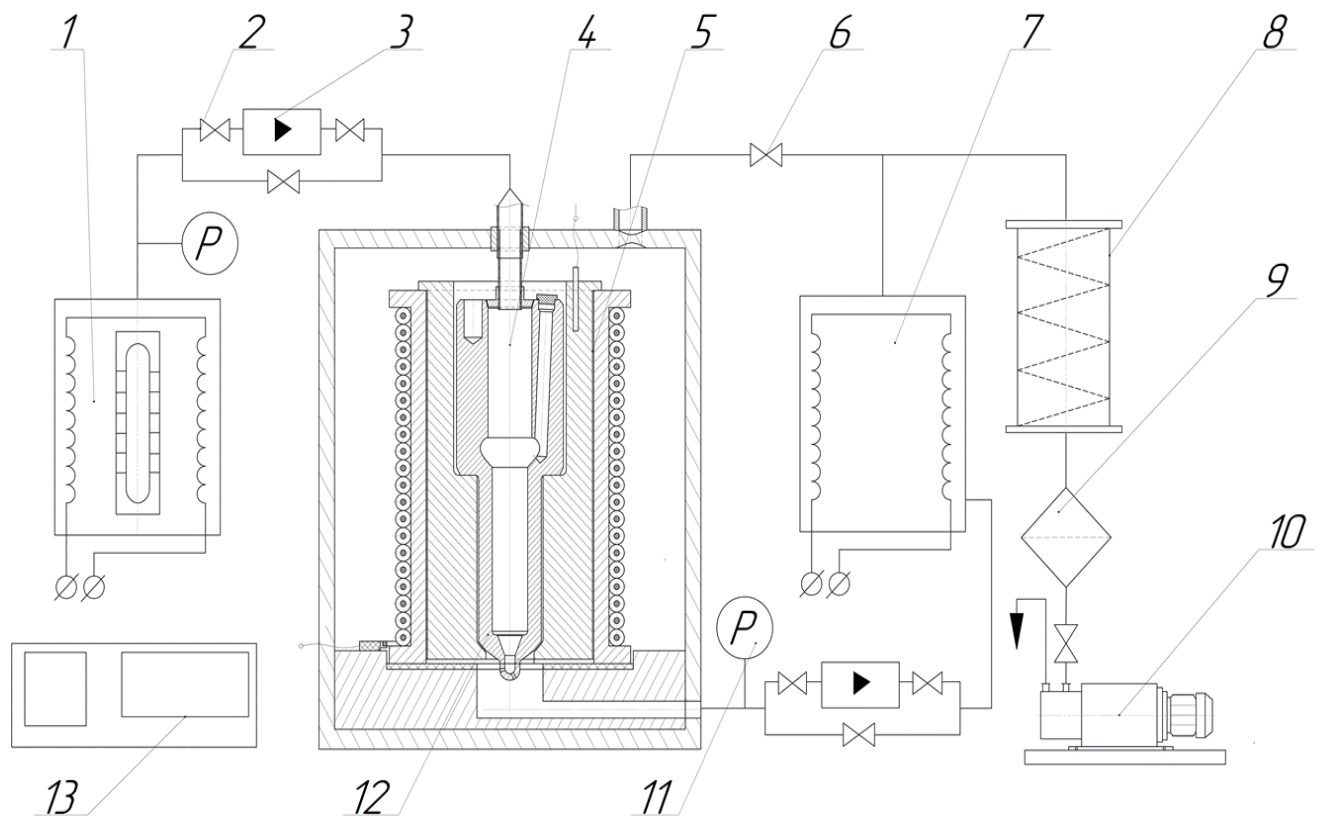
металлорганических соединений МОС внутри реактора при данном способе обеспечивает равномерное нанесение покрытия. Зародыши карбидов хрома образуются в зоне контакта с нагретой деталью при температуре, обеспечивающей проведение химической реакции [230].

Восстановление внутренних поверхностей корпуса распылителя данным способом невозможно из-за неравномерного осаждения карбидохромового покрытия. Соотношение диаметра отверстия к длине по направляющей поверхности корпуса 1:5. В связи с этим нами предлагается следующее решение этой проблемы.

Нами разработано новое устройство (патент RU 216021 U1 [148]), обеспечивающее равномерное нанесение карбидохромовых покрытий на внутренние труднодоступные поверхности корпуса распылителя за счёт протяжки реакционной среды, в том числе через распыляющие отверстия диаметром от 0,2 мм (рисунок 3.3).

Установка работает следующим образом. В сублиматор 1 загружается порошковый реактив гексакарбонила хрома $\text{Cr}(\text{CO})_6$, открываются вентили 2 расходомеров 3, открывается кран 6, идущий из реактора, предназначенный для ускоренного создания давления вакуума в реакторе и поддержания его при осаждении покрытия путём регулирования дросселя, перекрывающего трубопровод, включается вакуумный насос 10. На нихромовую нить подаётся ток для нагрева индуктора 5 и корпуса распылителя 12 до температур, установленных CVD-методом. Закрывается кран 2 сублиматора 1. Включается сублиматор 1, который нагревает реактив до требуемой температуры установленного режима и парциального давления паров. Открывается кран 2 сублиматора 1. Пары гексакарбонила хрома (МОС) по трубопроводу подводятся в реакционную камеру 4 через расходомер 3. В месте соприкосновения паров с нагретой поверхностью металла корпуса распылителя 12 образуется покрытие, состоящее из карбидов хрома. Побочным продуктом химической реакции разложения МОС является угарный газ CO, который удаляется из реакционной камеры 4 с помощью вакуумного насоса 13 через расходомер 3, печь доразложения 7, в которой

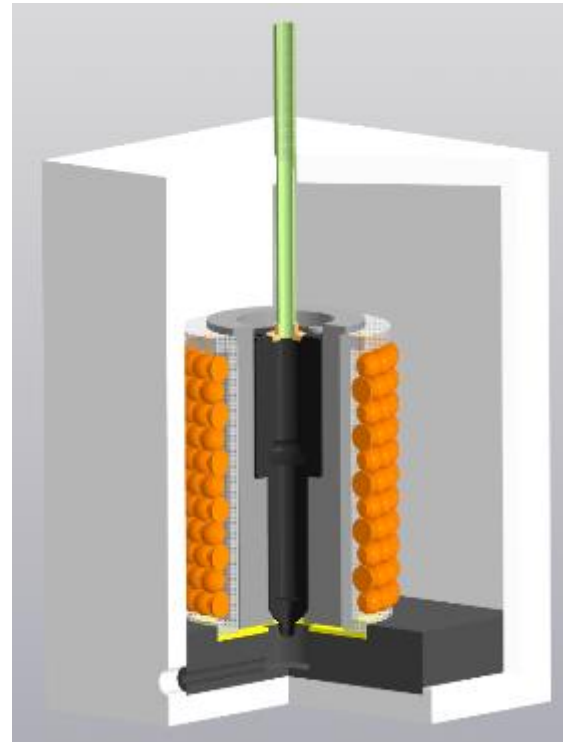
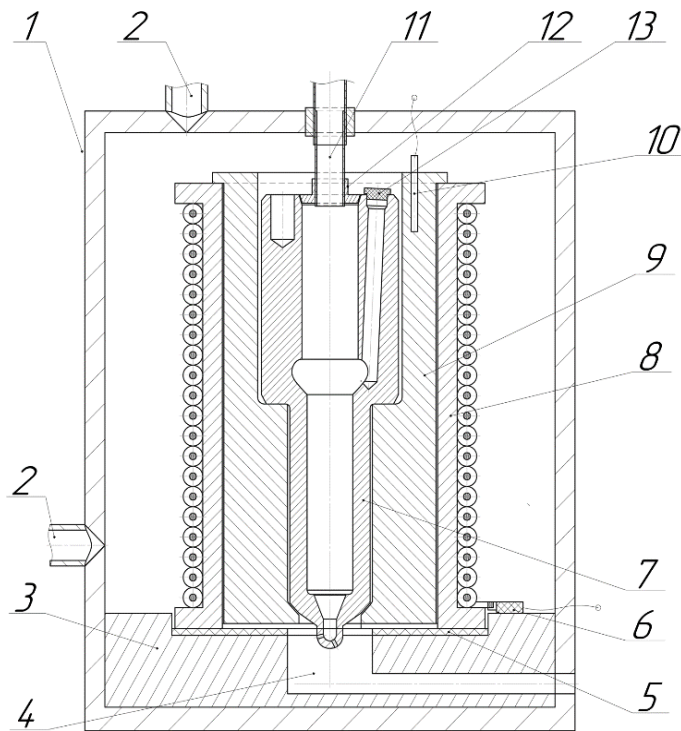
окисляется до CO_2 , и проходя через охладитель 8 и фильтр 9, выбрасывается в атмосферу. Запрограммированная контрольно-измерительная станция 13 осуществляет контроль за нагревом индуктора и паров карбонила, давлением вакуума в CVD-установке и паров в сублиматоре, подачей карбонила в реакционную камеру и отводом продуктов разложения с протяжкой реакционной среды через распыляющие отверстия корпуса распылителя.



- 1 – сублиматор; 2 – кран (вентиль); 3 – расходомер; 4 – реакционная камера;
 5 – индуктор; 6 – кран; 7 – печь доразложения; 8 – охладитель; 9 – фильтр;
 10 – вакуумный насос; 11 – датчик давления (вакууметр); 12 – деталь;
 13 – контрольно-измерительная станция.

Рисунок 3.3 – CVD-установка для формирования износостойкого покрытия карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки [148, 150].

На рисунке 3.4 представлена новая конструкция реактора CVD-установки, позволяющая восстанавливать внутренние поверхности корпуса распылителя форсунки автотракторного дизеля, а также аналогичные детали, например, втулка плунжера ТНВД при замене опоры 9 в индукторе 5 реактора 1.



1 – реактор; 2 – муфта; 3 – монтажный стол; 4 – газоотвод; 5 – пластина;
6 – клемма; 7 – корпус распылителя; 8 – нагреватель; 9 – опора; 10 – термопара;
11 – трубка телескопическая; 12 – втулка центрующая; 13 – заглушка.

Рисунок 3.4 – Реактор для восстановления внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки (а – кинематическая схема, б – 3D модель) [148, 150].

Реактор 1 имеет форму прямоугольного параллелепипеда и оборудован муфтами 2, предназначенными для подачи и откачки инертного газа. В реактор 1 устанавливается монтажный стол 3, в котором содержится газоотвод 4, служащий для удаления продуктов разложения химической реакции из зоны осаждения покрытия. В монтажном столе 3 предусмотрена установочная площадка под индуктор с устанавливаемой в неё пластиной 5, которая предназначена для снижения передачи тепла от нагревателя 8 к монтажному столу 3.

Индуктор состоит из нагревателя 8, опоры 9 и термопары 10 и в него устанавливается деталь 7. Нагреватель 8 состоит из втулки, на которую намотана нихромовая нить в керамических бусах. Опора 9 устанавливается в нагреватель 8. Для обеспечения равномерного нагрева и фиксации детали 7 в индукторе форма опоры 9 должна дублировать контур детали 7. Опора 9 быстросъёмная. В случае восстановления разнотипных внутренних поверхностей можно менять форму путём изготовления аналогичной опоры 9, но с внутренней формой, повторяющей внешнюю форму восстанавливаемой детали 7. В опоре 9 устанавливается термопара 10, определяющая температуру нагрева восстанавливаемой детали 7.

Подключение нагревателя 8 к электроцепи осуществляется через быстросъёмную жаростойкую клемму 6, монтируемую на монтажном столе 3, что позволяет оперативно установить и подключить индуктор.

К корпусу распылителя 7 подводится телескопическая трубка 11, по которой в процессе формирования износостойкого покрытия транспортируются пары металлоорганических соединений. Телескопическая трубка 11 выполнена из жаростойкого полимера, центрируется с деталью 7 через переходную втулку 12, обеспечивая плотность прилегания втулки 12 к восстанавливаемой детали 7, что определяет равномерность подачи потока паров МОС на внутреннюю восстанавливаемую поверхность. Заглушка 13 устанавливается в топливопровод корпуса распылителя и выполняет функцию защиты от нерационального использования реактива.

В рабочем режиме индуктор нагревается. Нагреватель 8 и опора 9 за счёт коэффициента теплового расширения металлов увеличиваются в размерах, обеспечивая плотную посадку между собой и корпусом распылителя 7 в индукторе, а индуктор жестко фиксируется в установочной площадке монтажного стола 3. Благодаря этому в реакторе 1 возможно обеспечить формирование износостойкого покрытия с помощью протяжки реакционной среды и исключить нерациональный расход реактива.

Для обеспечения надёжности и снижения вероятности получения некачественных покрытий при изготовлении реактора CVD-установки

применялись материалы представленные в таблице 3.1, согласно рекомендациям [39, 74, 128].

Таблица 3.1 – Номенклатура материалов для изготовления реактора.

Деталь	Материал	Марка	ГОСТ
Реактор	Нержавеющая сталь	X18H9T	[64]
Муфта	Нержавеющая сталь	X18H9T	[64]
Стол монтажный	Нержавеющая сталь	X18H9T	[64]
Пластина	Стеклотекстолит	ВФТ-С	[43]
Опора	Бескислородная медь	ДКРНТ	[45]
Нагреватель	Нержавеющая сталь	X18H9T	[58, 64]
Втулка центрующая	Бескислородная медь	ДКРНТ	[45]
Трубка телескопическая	Политетрафторэтилен	Фторопласт-4 ПН	[42]
Заглушка	Нержавеющая сталь	X18H9T	[54, 64]
Трубопроводы	Нержавеющая сталь	04X18H10T	[64, 69]

После изготовления установки в целях снижения газовыделения с отдельных материалов и деталей и после длительной вакуумизации проводили обработку поверхностей, находящихся в вакууме, бензолом и ацетоном.

На рисунке 3.5 представлена технологическая схема алгоритма работы разработанной CVD-установки с контрольными параметрами для нанесения износостойкого и упрочняющего покрытия на стальные детали [115, 196, 213, 230]. Данная схема описывает принцип работы установки с алгоритмом последовательно включаемых задач для получения качественных слоёв покрытия с заранее требуемыми свойствами.



Рисунок 3.5 – Схема технологического процесса формирования износостойкого покрытия на деталях.

Получение качественного карбидохромового покрытия на поверхности стальных деталей зависит от ряда факторов, влияющих на его формирование [19, 88, 151, 245, 247, 252]. В связи с этим применена причинно-следственная диаграмма (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Факторы, влияющие на осаждение карбидохромового покрытия.

Качественные характеристики карбидохромового покрытия зависят от технологического режима металлизации, который включает термодинамические условия, подачу реакционной среды и скорость осаждения. Физико-механические свойства определяются адгезией и требуемыми свойствами самого покрытия. В свою очередь качественные и физико-механические свойства определяются параметрами установки.

Скорость осаждения и качество покрытия зависят от конструкции реактора CVD-установки и технологического режима (давление вакуума, температуры подложки и реакционной среды, а также её подачи) [213, 214, 229, 230]. Разность давлений вакуума в сублиматоре и реакторе, как отмечалось выше, обеспечивает направленное движение реакционной среды.

В целях удаления оставшихся молекул воздуха из системы CVD-установки и при добавлении к парам карбонила добавок в виде попутных газов в конструкции реактора [148] предусмотрена возможность для подвода и отвода в первом случае инертного газа, а во втором газа разбавителя, который позволяет ускорять рост покрытия и снижать температуру термодинамических реакций. В данной работе проводились исследования без участия газа разбавителя.

В схеме CVD-установки [148], кроме реактора предлагается новая конструкция индуктора рисунок 3.3. Индуктор обеспечивает усиленный теплообмен между подложкой и нагревателем, что уменьшает колебания температуры и, как следствие, позволяет получить равномерную горизонтальную структуру покрытия при низкотемпературном осаждении 123...191 °С

Оптимальная температура термораспада в реакторе для гексакарбонила хрома 60 °С рекомендована Н.Н. Чупятовым [230].

Для нанесения покрытий нами использовался гексакарбонил хрома $\text{Cr}(\text{CO})_6$, который имеет номер уникального численного мирового идентификатора химических соединений CAS 13007-92-6.

Гексакарбонил хрома в нормальных условиях — это белый кристаллический порошок, молекулярная масса которого составляет 220,06 г/моль, температура начала сублимации 30 °С (303 К), плотность при 20 °С – 1,77 г/см³, молярная

теплоёмкость 240 Дж/(моль x К) [142]. Повышение температуры гексакарбонила хрома на каждые 10°С при сублимации приводит к увеличению парциального давления его пара, определяемое функцией натурального логарифма. При нагреве Cr(CO)₆ сублимируется в газ, минуя стадию жидкости, и формирует реакционную среду. Реакционная среда при контакте с нагретой стальной подложкой образует металлическое покрытие, состав которого зависит от температурного режима подложки.

Механизм формирования покрытия осуществляется следующим образом. Поступающая из газовой фазы карбонильная молекула получает от горячей поверхности детали механический импульс. Полученная энергия распределяется с поступательных на колебательные степени свободы молекулы, что приводит к элиминированию нейтральных СО-лигандов. Освобождающийся при этом атом металла осаждается на поверхность подложки, как ад-атом, движущийся до попадания на подходящее вакантное место в строящейся кристаллической решётке покрытия. Происходит формирование зародышей, из которых, в зависимости от установившегося температурного режима подложки, наращивается твёрдофазный слой металла или карбида [19, 88, 213, 245, 247, 252].

Таким образом, совокупность всех факторов определяет качество осаждаемого покрытия, которое зависит от режима металлизации.

3.4. Методика выбора оптимального режима осаждения карбидохромового покрытия

Карбидохромовые покрытия, получаемые в ходе упрочнения и восстановления деталей распылителя форсунки, должны иметь достаточную сцепляемость с подложкой, высокую микротвёрдость и шероховатость поверхности. Эти характеристики покрытия зависят от режима ведения металлизации.

Поиск оптимальных условий является одной из наиболее распространенных научно-технических задач, которая возникает в тот момент, когда установлена

возможность проведения процесса и необходимость найти наилучшие (оптимальные) условия его реализации. В целях определения получаемых физико-механических свойств покрытий провели пассивный эксперимент, благодаря которому определили микротвёрдость, скорость формирования покрытия, подачу реакционной среды в реактор.

При активном эксперименте изучалось влияние изменяемых факторов: давление вакуума в системе CVD-установки, температуры подложки и реакционной среды, а также её подачу в зону формирования покрытия. В качестве параметра оптимизации выбирали микротвёрдость и скорость подачи реакционной среды карбидохромового покрытия. Принятые переменные факторы являются управляемыми и однозначными. Совокупность факторов обеспечивает совместимость и отсутствие линейных зависимостей друг с другом.

Для решения задачи поиска оптимального режима осаждения карбидохромового покрытия на стальную подложку с учётом всех факторов использовался математический метод планирования эксперимента с помощью кибернетической системы [2, 3, 9, 71, 79, 92, 119, 140, 164, 180, 186, 212]. В основу данного метода положена концепция одновременного варьирования факторами, влияющими на конечный результат. Подробная методика расчёта представлена в главе 4.

3.5. Методика определения макрогеометрии деталей распылителя

Линейные размеры определялись с помощью рычажной скобы СР 0-25-0,002 ГОСТ 11098 с ценой деления 0,002мм.

Измерение направляющей в корпусе распылителя проводилось индикаторным нутромером с ценой деления 0,001 мм в двух сечениях, отстоящих на 5 и 17 мм от его уплотняющего торца.

Диаметры запирающего конуса корпуса и иглы распылителя определялись на приборах, оснащённых индикаторными головками часового типа с ценой деления 0,01 мм ГОСТ 6933.

Шероховатость поверхностей деталей фиксировалась с помощью профилографа-профилометра модели 201 “Калибр” ГОСТ 19300. Шероховатость определяли в соответствии с ГОСТ 2789 по параметрам Ra и Rz. Среднеарифметическое отклонение профиля Ra определяли по показаниям прибора, высоту неровностей Rz по профилограмме, записанной на приборе. Скорость перемещения датчика с алмазной иглой составляла 0,1 мм/мин. За действительное значение величины Ra и Rz принималось среднеарифметическое значение из шести размеров.

Износы направляющих определялись микрометражём.

Гидроплотность, давление начала впрыскивания, качество распыливания топлива и подвижность иглы определялись на стенде PRW-3 производства ПНР в соответствии с ГОСТ 10579 и ГОСТ 8669 [44, 66].

3.6. Исследование скорости формирования покрытий

Скорость осаждения покрытий на опытные образцы, изготовленные из стали 12Х2Н4А ГОСТ 4543 [41], определялась на разных режимах металлизации, в которых изменяли температуру подложки, давление вакуума и скорость подачи реакционной среды при постоянной температуре. Температура подложки изменялась в диапазоне от 150 до 195°С при давлении вакуума в системе 0,1; 0,01 и 0,001 Па и скорости подачи реакционной среды 1, 2 и 3 л/час.

Скорость роста покрытий определялось по росту массы. Взвешивание выполнялось на лабораторных весах ВМ-II с точностью до 0,1мг с повторностью замеров не менее 3х раз.

3.7. Методика металлографических исследований

Перед проведением металлографических исследований изготавливали микрошлифы образцов, которые затем помещали в стальные кольца и заливали эпоксидной смолой.

Далее образцы шлифовались на плоскошлифовальном станке с обильной подачей охлаждающей жидкости, а затем на кругах из водостойкой шкурки ГОСТ 13344 [48] с зернистостью 25 и 10 с добавлением керосина.

На заключительном этапе шлифы полировались на суконном круге отмульченной окисью хрома с обильной подачей воды. После тщательной промывки в воде и осушения производилось химическое травление шлифов.

Сталь травилась в 5 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте, при этом выявляются феррит, цементит, карбиды не травятся.

Для углеродистых сталей использовался также 5 %-й раствор азотной кислоты в амиловом спирте. После травления в реактиве аустенит окрашивается в желтоватый цвет, сорбит и троостит – в коричневый, мартенсит не травится. Для дифференциации карбидов хрома применялся реактив следующего состава:

- пикриновая кислота, г – 5;
- едкий натр, г – 20;
- вода дистиллированная, мл – до 100.

Травление в реактиве окрашивает карбиды хрома Cr_3C_2 в светло-серый цвет. После травления шлифы промывались этиловым спиртом.

Определение качества покрытий производилось визуально, фотографирование микрошлифов производилось с помощью инвертированного металлографического микроскопа GX53.

3.8. Определение микротвердостей покрытия и подложки

Исследование микротвёрдости проводили по методу Виккерса на твердомере DuraScan 20 G5 путём вдавливания алмазной пирамиды с углом при вершине 136° и нагрузкой 0,2Н и 1Н в течение 15 с., руководствуясь ГОСТ 9450 [68]. Опыты проводились с трёхкратной повторяемостью на каждом образце. В данных опытах упрочнённый корпус распылителя перед снятием показаний разрезали.

Определение размеров диагоналей отпечатка осуществлялось инвертированным металлографическим микроскопом GX53.

Покрyтия наносились при температурах МОС 60°С и подложки 150, 175 и 195°С. Давление в камере поддерживалось в пределах 0,1–0,001 Па.

Микротвёрдость покрывания определяли по формуле:

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (3.1)$$

где F – нагрузка на пирамидку, Н; d – среднее арифметическое длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки с индентера, мм.

Глубина проникновения индентера в подложку и покрывание $h_{и}$ определяли из геометрического соотношения между высотой пирамиды и её диагональю у основания d [95, 174]:

$$h_{и} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (3.2)$$

где α – угол пирамидки индентера твердомера, °.

3.9. Рентгеноструктурный и масс-спектральный анализы покрываний

Рентгеноструктурный анализ карбидохромовых покрываний проводили с поверхности образца и по всей толщине покрывания на рентгеновском дифрактомере Rigaku. Съём рентгенограмм производился с поверхности образцов, подвергавшихся последовательному шлифованию через 25 мкм на глубину 300 мкм. Напряжение на трубке составляло 26 ... 30 В. Диапазон исследуемых углов изменялся в пределах 20...140°. По интенсивности линий рассчитывались межплоскостные расстояния дифракционных линий, которые сравнивались с картой АСТМ [204] или справочной литературой [169]. При этом учитывалась и относительная интенсивность линий.

Распределение элементов по глубине карбидохромового покрывания до 100 мкм исследовали на растровом электронном микроскопе «Sam scan» английской фирмы «Link systems». В основу рентгеноспектрального анализа положен принцип облучения исследуемой поверхности образца тонко сфокусированным электронным пучком [219, 220], в результате взаимодействия которого с поверхностью образца возникает электронное излучение, образующееся при

взаимодействии падающих электронов с элементами внутренних оболочек атомов в образце.

3.10. Исследование остаточных напряжений

Значения остаточных напряжений в карбидохромовом покрытии на опытных образцах, выполненных из стали 20Х ГОСТ 4543 [63, 130, 230], определяли с помощью измерения их прогиба до осаждения на них износостойкого слоя и после. Температура низкого отпуска стали образцов 180°C . Образцами служили четыре пластины с линейными размерами 90×4 мм и толщиной 1 мм (рисунок 3.7).

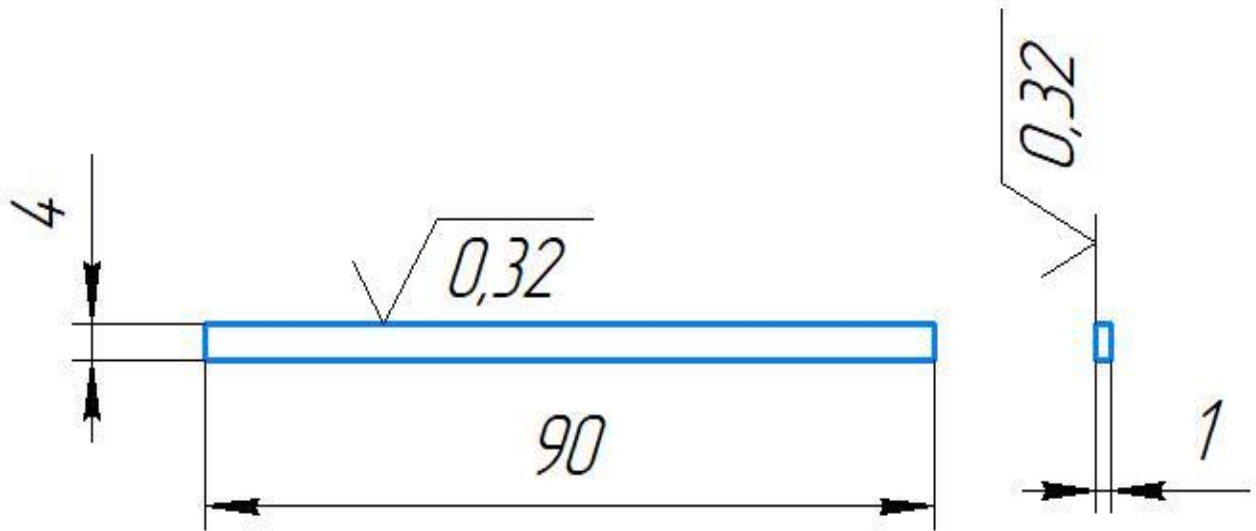


Рисунок 3.7 – Образец для определения остаточных напряжений.

Перед определением остаточных напряжений в покрытии образец подготавливали к осаждению на него карбида хрома путём зашлифовки поверхности образца шероховатости не ниже $Ra0,2$. Для монтажа образца в испытательный стенд и получения достоверных с него данных края пластины-образца закрывали фторопластовыми накладками для предотвращения осаждения на них покрытия. После этого на одну плоскость образцов осаждалось карбидохромовое покрытие с толщиной слоя 50, 75, 100 и 200 мкм. Далее проводились замеры стрелы прогиба индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленного в измерительную скобу. Процесс выполнения измерений приведён на рисунке 3.8.

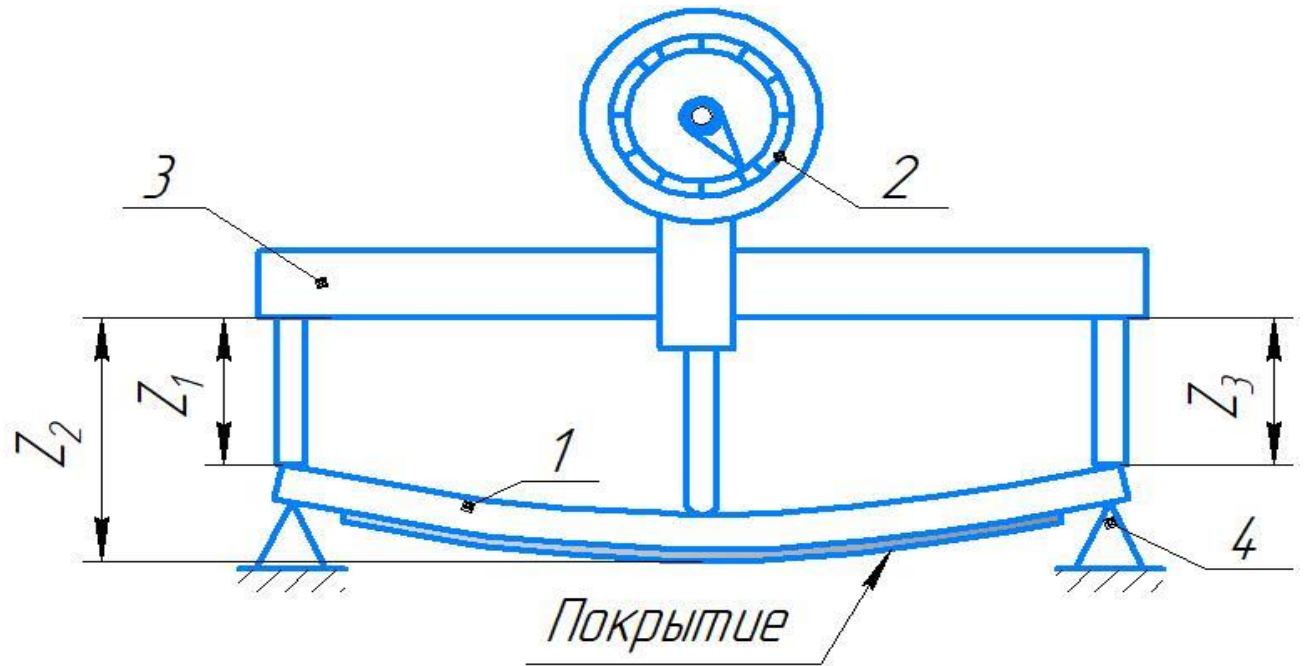


Рисунок 3.8 – Схема выполнения замеров стрелы прогиба:

1– образец; 2 - индикатор часового типа; 3 - измерительная скоба; 4 – опоры.

В процессе измерений определяли прогиб пластины по разнице базирующих размеров в следующей зависимости:

$$f = \frac{(Z_1 + Z_3)}{2} - Z_2 \quad (3.3)$$

Вычисление среднего значения остаточных напряжений в покрытии проводили по следующему уравнению [230]:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{4E(h+h_{\text{п}})^3 \cdot f}{3l^2 h h_{\text{п}}} \quad (3.4)$$

где E – приведённый модуль упругости покрытия на стали, Н/мм²; l – длина покрываемой части образца, $l = 82$ мм; h – толщина пластины образца, мм; $h_{\text{п}}$ – толщина осаждённого покрытия, мм.

Значение величины остаточных напряжений в покрытиях на каждом образце определялось как среднее значение при трёх измерениях прогиба.

3.11. Определение прочности сцепления покрытия с основой

Для исследования прочности сцепления полученных покрытий на внутренней поверхности корпуса распылителя применяли метод сдвига. Опорой для сдвига служила направляющая иглы распылителя форсунки, нижняя часть которой шлифовалась до диаметра контакта с осаждённым покрытием в корпусе (рисунок 3.9). Перед осаждением карбидохромового покрытия игла подбиралась под диаметр направляющей с зазором 4...8 мкм.

Сдвиг поясков осуществлялся на машине ИМ-4А. Показания записывались в зависимости от деформации и приложенной нагрузки $\Delta L = f(P)$. Повторность замеров принималась не менее 3х кратной. Прочность сцепления (напряжение сдвига) определялась по формуле:

$$\sigma_c = \frac{P}{(\pi r_H^2 - \pi r_B^2)L} \quad (3.5)$$

где P – сила, при которой произошёл сдвиг пояска, Н; r_H, r_B – радиус направляющей без и с упрочняющим покрытием, мм; L – высота пояска, мм.

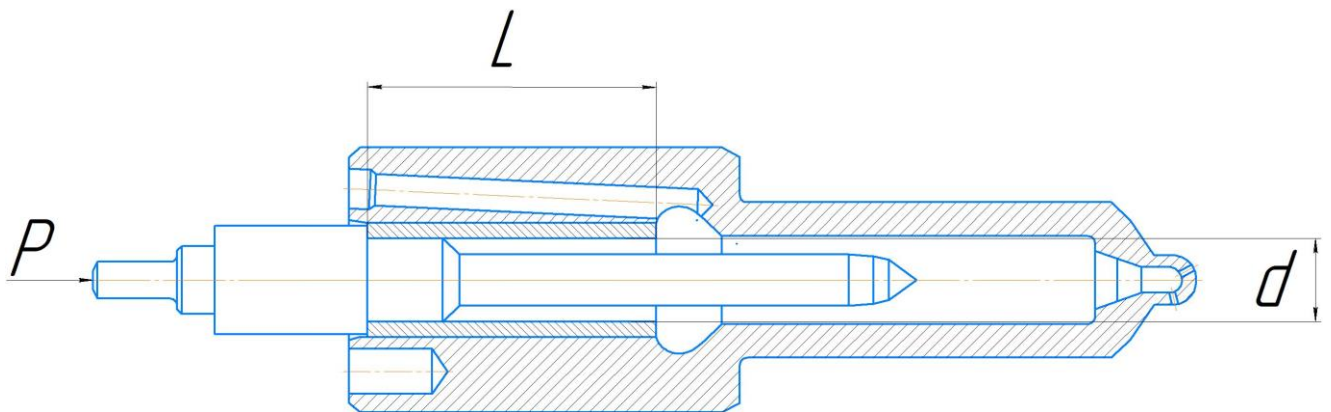


Рисунок. 3.9 – Схема определения прочности сцепления.

3.12. Исследование износостойкости покрытий

Сравнительная износостойкость карбидохромовых покрытий оценивалась на образцах типа “диск-колодка” (рисунок 3.10) на машине трения СМЦ-2. В опытах определялась износостойкость сопряжения образцов, зависящая от микротвёрдости осаждённого на диск покрытия.

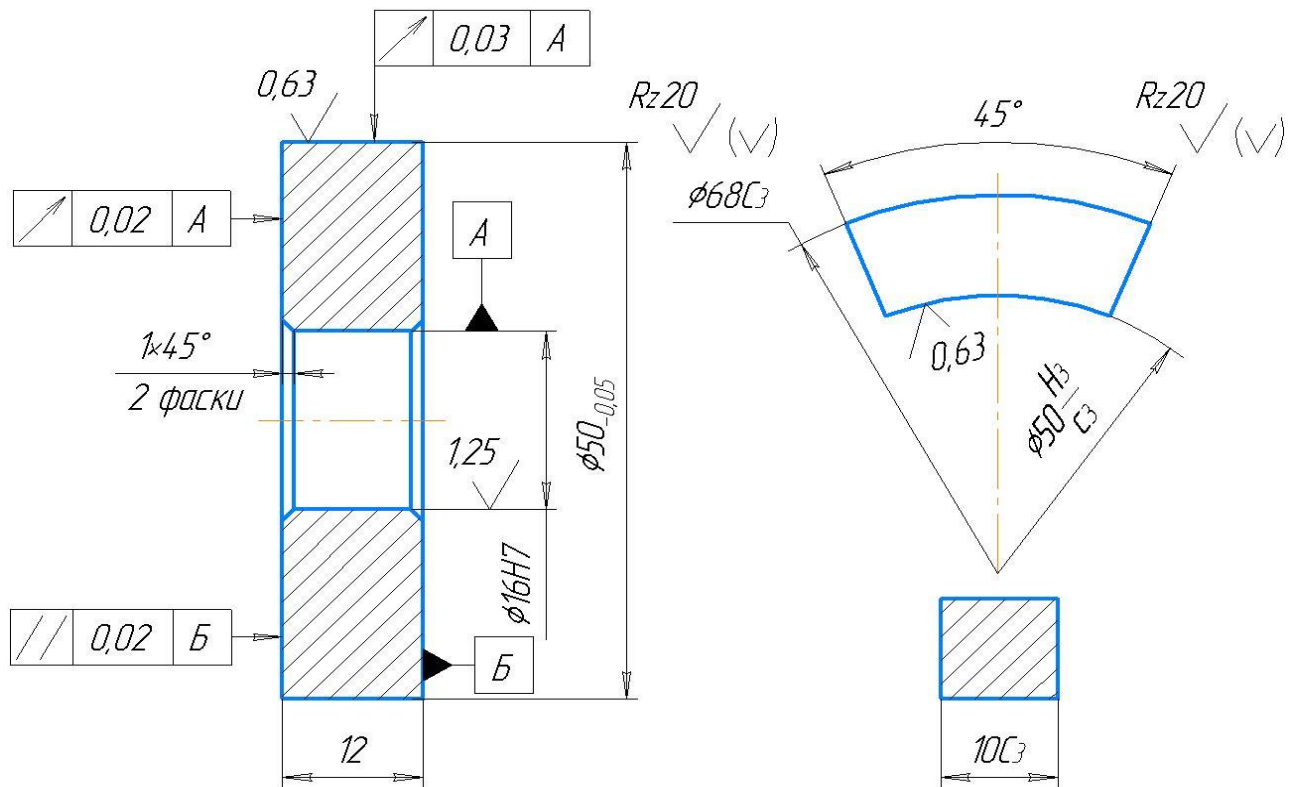


Рисунок 3.10 – Образцы для испытания на износостойкость.

Лабораторными испытаниями предусматривалось определение сравнительной оценки износостойкости образцов, изготовленных по заводской технологии и упрочнённых карбидохромовым покрытием CVD-способом. Испытаниям подвергались пары трения в следующих сочетаниях:

1. Диск из стали Р6М5 (HRC 63...65) и колодка из серого чугуна СЧ20 (HRC 50...53) ГОСТ 1412 [49];
2. Диск из стали 12Х2Н4А (HRC 60...62) и колодка из серого чугуна СЧ20 (HRC 50...53) ГОСТ 1412 [49];
3. Диск с карбидохромовым покрытием на стали Р6М5 и колодка из серого чугуна СЧ20 (HRC 50...53) ГОСТ 1412 [49];
4. Диск с карбидохромовым покрытием на стали 12Х2Н4А и колодка из серого чугуна СЧ20 (HRC 50...53) ГОСТ 1412 [49].

Толщина покрытия во всех случаях составляла 100 мкм.

Испытания на износ проводили при удельном давлении $1,275 \text{ МН/м}^2$ или 250Н и скорости скольжения 0,786 м/с ($n = 300 \text{ мин}^{-1}$). Колодку закрепляли в

плавающей обойме, обеспечивающей равномерное распределение внешней нагрузки. В зону трения образцов подавалось масло индустриальное И-20А ГОСТ 20779 [56], запылённое кварцевым абразивом по ГОСТ 2138 [57] с удельной поверхностью $S = 10500 \text{ см}^2/\text{г}$ и концентрацией 0,6 % по массе. Подача масла – 4...6 капель в минуту.

В ходе опытов температура в зоне контакта образцов (зоне трения) выдерживалась в диапазоне 60...80 °С, что достигалось циркуляцией рабочей жидкости через камеру. По истечению трёх часов образцы извлекались, мылись ацетоном, обдувались струёй сжатого воздуха и взвешивались на лабораторных весах ВМ-II с точностью до 0,1 мг. Данный цикл повторялся до полного истирания осаждённого покрытия.

В качестве эталона для сравнения принималась пара образцов диск – колодка, где диск был изготовлен из стали Р6М5 ГОСТ 19265 [55], а колодка из стали 12Х2Н4А [63] и не имели покрытия.

Для определения интенсивности изнашивания как упрочнённых, так и неупрочнённых образцов в ходе испытаний, применялась следующая формула:

$$J = \frac{W}{L} \quad (3.6)$$

где W - величина износа (по массе) образца типа диск в сопряжении, кг; L - путь трения в сопряжении образцов, на который приходится износ, м.

Далее вычислялась износостойкость образцов:

$$\varepsilon = \frac{1}{J} \quad (3.7)$$

В ходе испытаний на износостойкость, опыты выполнялись, согласно ГОСТ 16504 [51], с трехкратной повторностью.

3.13. Исследование коррозионной стойкости покрытий

Для определения коррозионной стойкости опытные и серийные детали испытывали в 10%-х растворах концентрированных кислот: азотной, серной и

щёлочи (NaOH). Образцы для коррозионных испытаний изготавливали из марок сталей 12Х2Н4А и Р6М5. На образец из стали Р6М5 наносили карбидохромовое покрытие (100 мкм). Образцы были разбиты на 2 группы. Одну группу подвергали парофазной металлизации.

Для испытания образцов использовали стеклянную тару ёмкостью 500 мл. После каждого этапа, длительностью 24 ч, проверяли и восстанавливали исходную концентрацию раствора. В одной ёмкости находились 3 образца по одному из каждой партии [36, 98].

Оценку коррозионной стойкости производили по потере массы образцов и по времени до появления первого очага коррозии. Взвешивание образцов производили на электронных лабораторных весах ВМ-II весами с точностью до 0,1 мг. Повторность замеров принималась не менее троекратной. Перед взвешиванием образцы промывали в тёплой проточной воде, очищали волосяной щёткой от коррозионных отложений, промывали в спирте и сушили в шкафу. Температура окружающей среды составляла 20...22 °С.

3.14. Методика проведения эксплуатационных испытаний восстановленных деталей

Для проведения эксплуатационных испытаний опытные образцы распылителей были установлены на новые топливные форсунки типа ФД-22, идущие под номенклатурными номерами 39.1112010-05, 171.1112010-01 и 261.1112010-11, с целью исключения воздействий изношенных деталей. Игла и корпус распылителя были восстановлены упрочняющим карбидохромовым покрытием, полученным парофазной химической металлизацией CVD-способом.

Эксплуатационные испытания опытных распылителей форсунок проводились в условиях рядовой эксплуатации в сельскохозяйственном производственном кооперативе СПК «Мурава» расположенном в Московской области в Шаховском районе. Форсунки устанавливались на трактора, соответственно, МТЗ-80 с двигателем Д-240, МТЗ-82.1 с двигателем Д-243 и ХТЗ

Т-150К с двигателями ЯМЗ-236, работающих на транспортных и общих сельскохозяйственных работах.

3.15. Методика обработки экспериментальных данных

Оценку точности экспериментальных данных проводили, согласно методики [111, 211].

Среднеарифметическое значение параметра \bar{x} определяли по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.8)$$

где x_i – результат i -го измерения (опыта); n – количество измерений.

Среднее квадратическое отклонение вычисляли по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.9)$$

Рассчитывали коэффициент вариации:

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \quad (3.10)$$

Определяли ошибку выборочной средней:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.11)$$

Находили относительную погрешность:

$$S_{\bar{x}\%} = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (3.12)$$

Точность однократных измерений оценивали пределами допустимой погрешности приборов.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Возможность получения покрытий при низкотемпературном осаждении

Проведён сравнительный металлографический анализ сталей 12Х2Н4А и Р6М5, применяемых при изготовлении деталей распылителя форсунки, до и после осаждения на них карбидохромового покрытия (рисунок 4.1 и 4.2). Формирование покрытия проводилось при давлении вакуума 0,1 Па, температуре подложки 195°С, температуре реакционной среды 60°С и со скоростью её подачи 1,0 л/час. Установлено, что при этом давлении вакуума и температуре подложки осуществляется осаждение карбидохромового покрытия без изменения внутренней структуры стали.

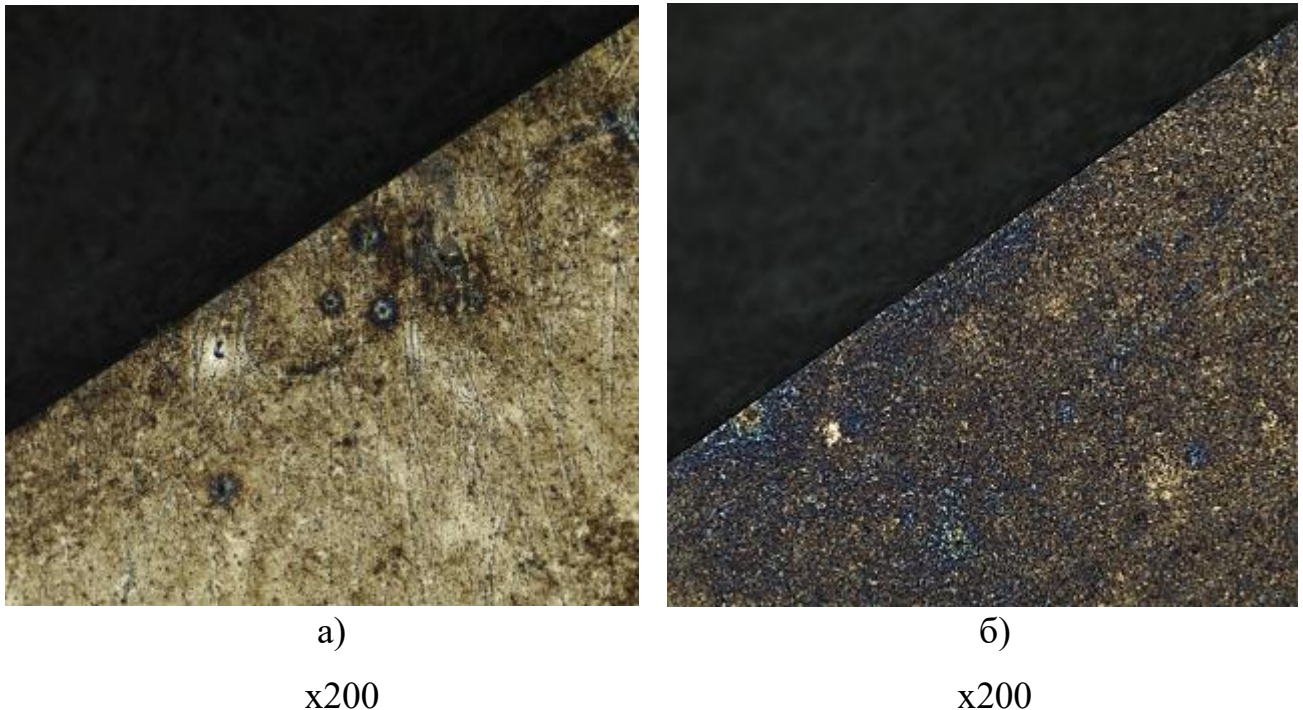


Рисунок 4.1 – Микроструктура поверхностного слоя сталей до нанесения карбидохромового покрытия CVD-способом: а) – 12Х2Н4А; б) – Р6М5.

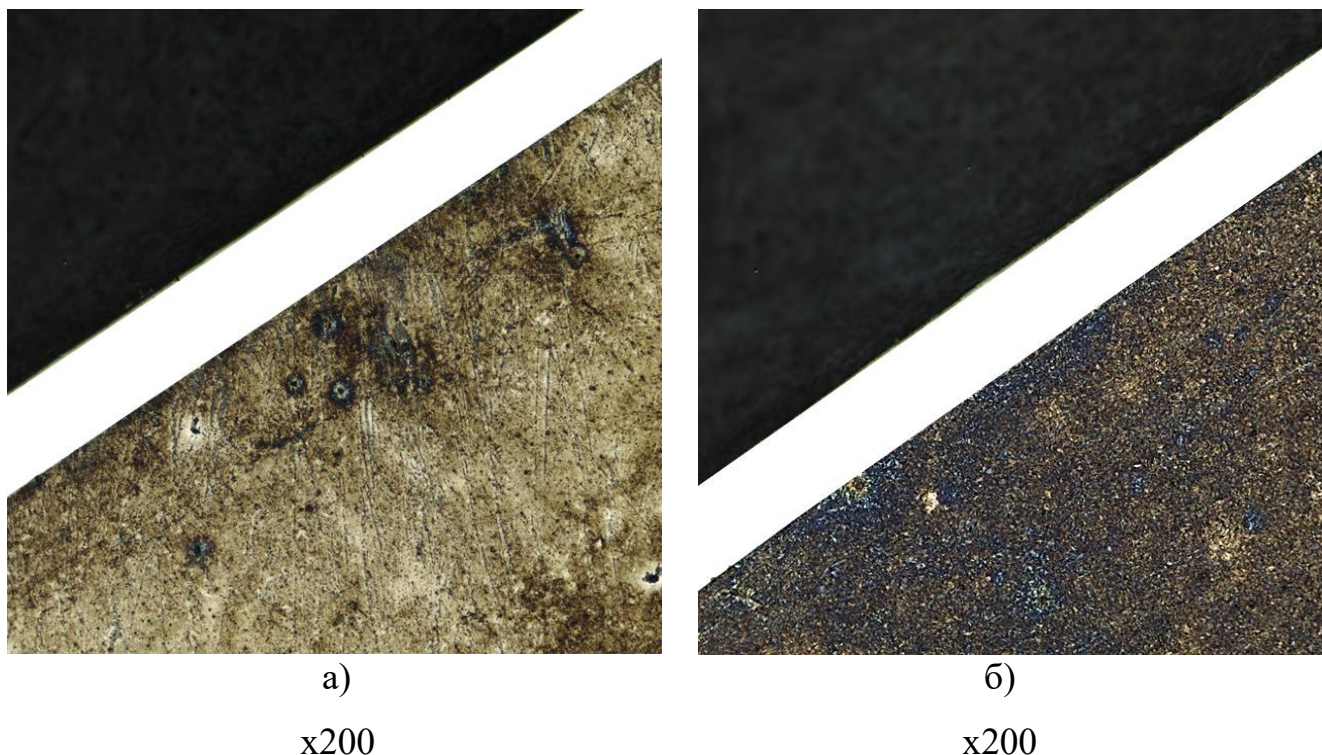


Рисунок 4.2 – Микроструктура поверхностного слоя сталей после нанесения карбидохромового покрытия CVD-способом при давлении вакуума 0,1 Па, температуре подложки 195 °С: а) – 12X2H4A; б) – P6M5.

Для подтверждения теоретических исследований и поиска оптимального режима ведения металлизации провели низкотемпературное осаждение карбидохромового покрытия на детали-образцы при давлении вакуума 10^{-1} , 10^{-2} и 10^{-3} Па, температуре 150, 175 и 195 °С, температуре МОС 60 °С и со скоростью подачи реакционной среды 1, 2 и 3 л/час (рисунок 4.3 – 4.5).

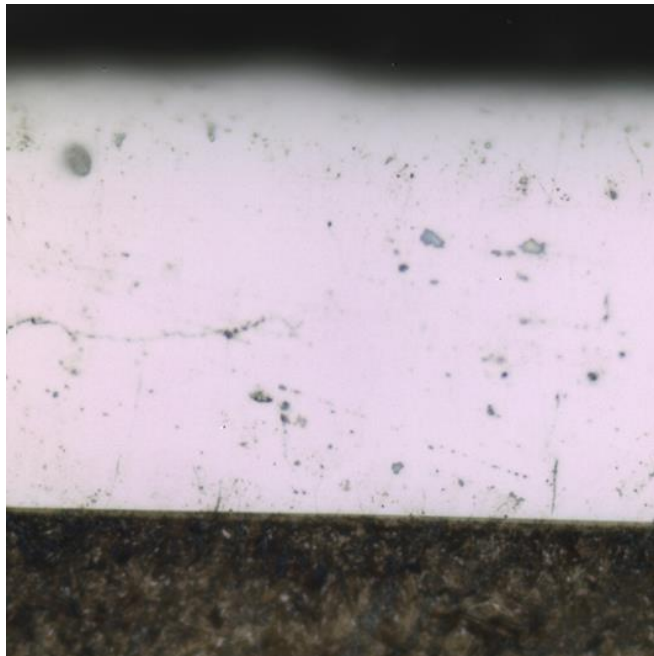
Для определения качества и скорости роста получаемого покрытия его осаждение проводили при постоянной скорости подачи карбонила в реакционную камеру в течение одного часа.

Установлено, что с увеличением давления вакуума и уменьшением температуры подложки снижается количество примесей в карбидохромовом покрытии, что улучшает его микроструктуру. Наиболее вероятная причина — это смещение термодинамического равновесия химических реакций в сторону образования карбида хрома. При давлении вакуума 0,001 Па изменение температуры металлизации не приводит к видимым дефектам в покрытии.



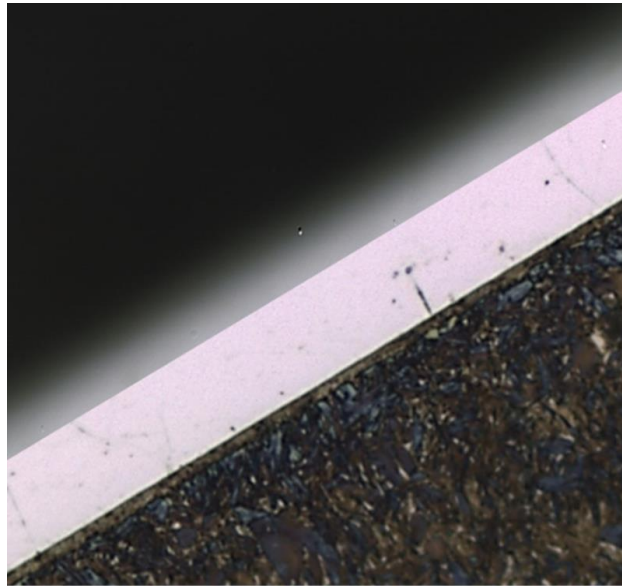
x200

Рисунок 4.3 – Микроструктура поверхностного слоя стали 12Х2Н4А после нанесения карбидохромового покрытия при давлении вакуума 0,1 Па, температуре подложки 195 °С и реакционной среды 60°С и скорости подачи реакционной среды 3,0 л/час, толщина покрытия 270 мкм.



X500

Рисунок 4.4 – Микроструктура поверхностного слоя стали P6M5 после нанесения карбидохромового покрытия при давлении вакуума 0,01 Па, температуре подложки 175 °С и реакционной среды 60°С и скорости подачи реакционной среды 2,0 л/час, толщина покрытия 105 мкм.



x1000

Рисунок 4.5 – Микроструктура поверхностного слоя стали Р6М5 после нанесения карбидохромового покрытия при давлении вакуума 0,001 Па, температуре подложки 150 °С и реакционной среды 60°С и скорости подачи реакционной среды 1,0 л/час, толщина покрытия 10 мкм.

Проведена серия экспериментов по исследованию оптимальной скорости подачи реакционной среды в зону ведения металлизации (рисунок 4.6) и коэффициента использования реактива (рисунок 4.7) в условиях давления вакуума 0,01 Па при температурах подложки 150, 175 и 195°С и паров $Cr(CO)_6$ – 60°С.

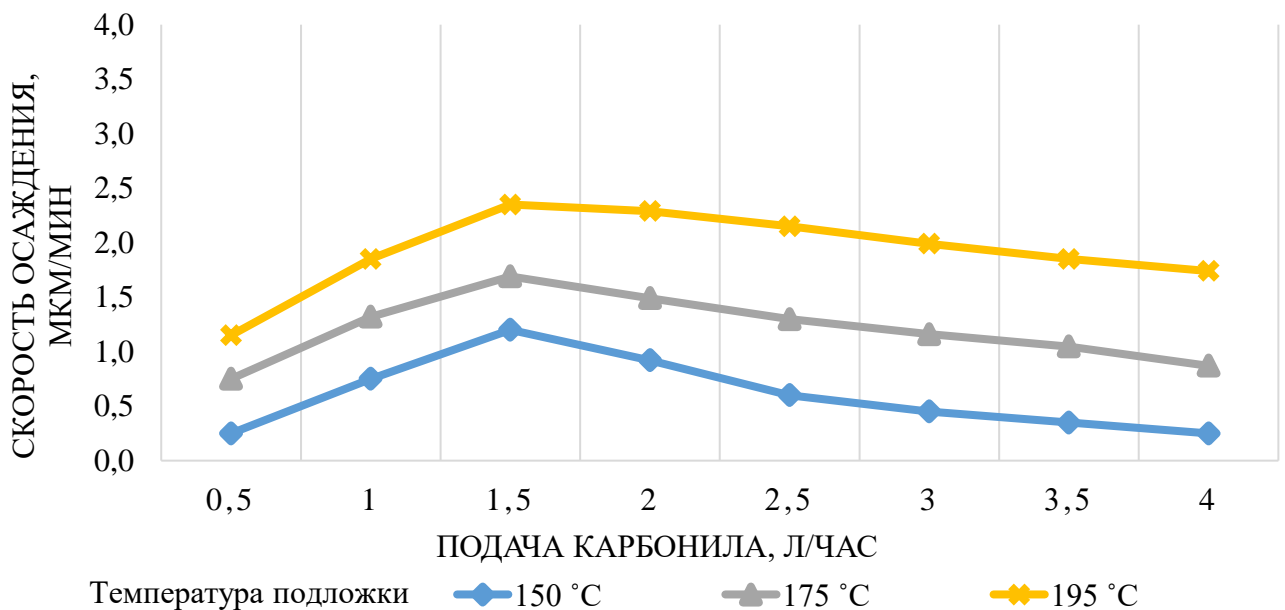


Рисунок 4.6 – Зависимость подачи паров гексакарбонила хрома от скорости роста покрытия.

Установлена оптимальная скорость подачи реактива в реакционную камеру 1,5 л/час. Производить осаждение карбидохромового покрытия при скорости подачи реактива свыше оптимальной неэффективно, так как снижается скорость роста покрытия и увеличивается расход гексакарбонила хрома из-за низкой энергии изобарно-изотермического потенциала и эндотермичности химической реакции термораспада. Кроме того, с увеличением подачи в покрытии формируется большое количество примесей, которые влияют на физико-механические свойства.

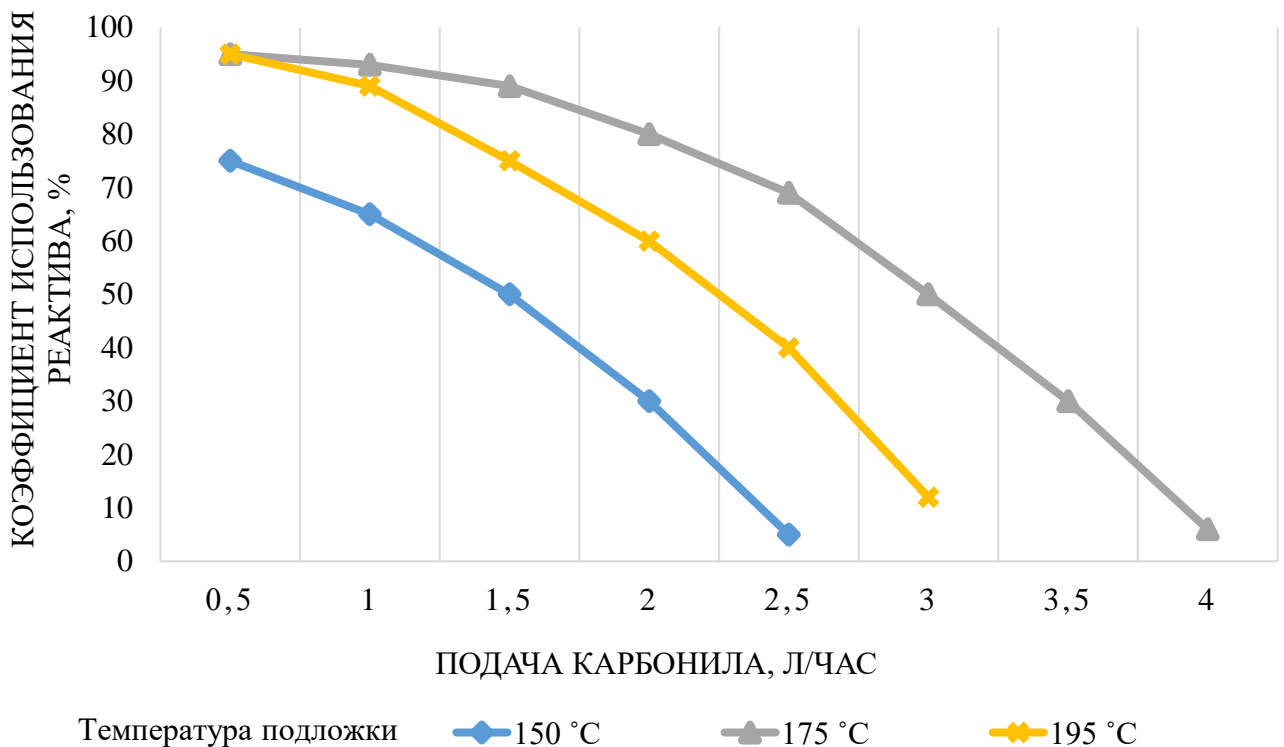


Рисунок 4.7 – Влияние подачи паров гексакарбонила хрома на использование реактива.

Установлено влияние давления вакуума на скорость осаждения карбидохромового покрытия в зависимости от температурного режима подложки при постоянной скорости подачи гексакарбонила хрома 1,5 л/час (рисунок 4.8). С повышением давления вакуума и понижением температуры подложки в реакторе снижается скорость осаждения карбидохромового покрытия. Наиболее вероятная причина — это уменьшение концентрации молекул хрома и углерода в свободном состоянии, образовавшихся в результате снижения интенсивности термораспада

гексакарбонила хрома, которая зависит от значения энергии Гиббса и нарушения адсорбционно-десорбционного механизма формирования карбидохромового слоя.

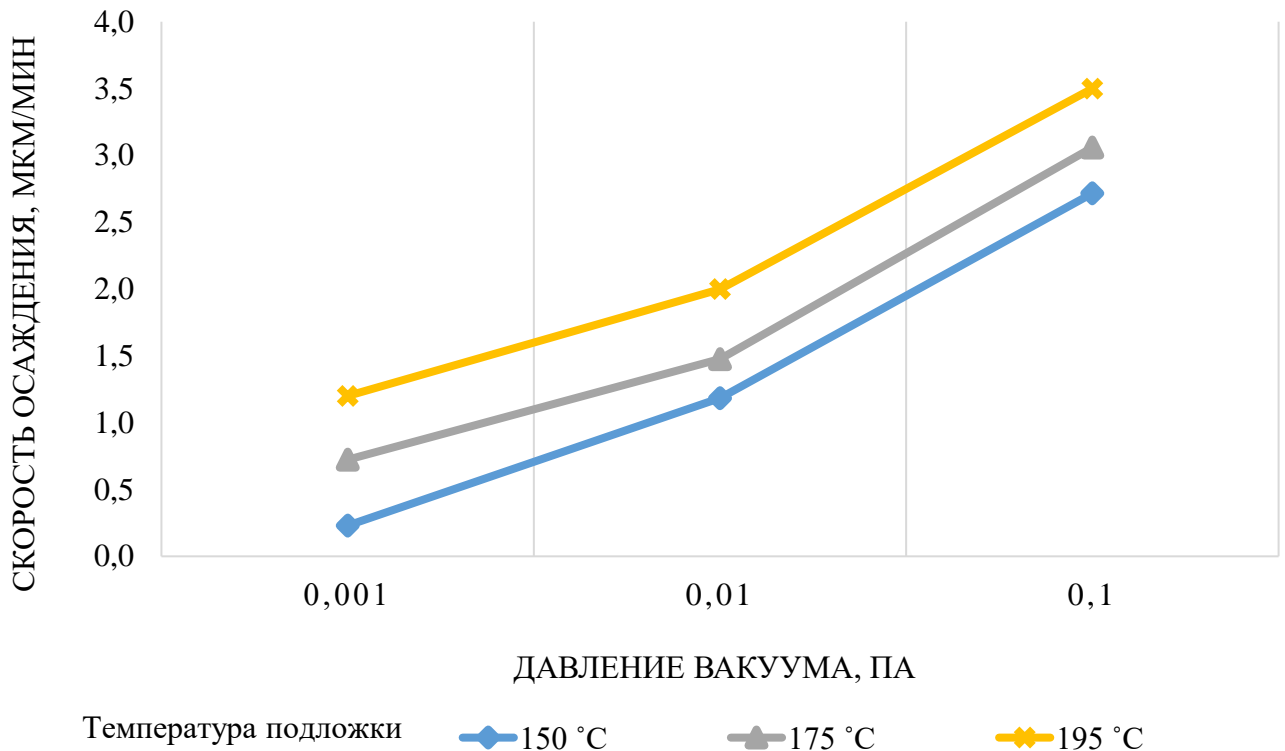


Рисунок 4.8 – Влияние давления вакуума на скорость осаждения покрытия при температуре подложки 150, 175 и 195 °C при скорости подачи паров 1,5 л/час.

В соответствии с теорией изнашивания при контактно-абразивном взаимодействии минимальная микротвёрдость поверхности деталей для условий обеспечения многоциклового изнашивания должна быть не менее 16,8 ГПа [98, 102, 173, 215, 225]. Проведены исследования по влиянию давления вакуума на микротвёрдость карбидохромового покрытия, полученного при низкотемпературном осаждении (рисунок 4.9).

Установлена зависимость роста микротвёрдости покрытия при увеличении давления вакуума и уменьшении температуры подложки в реакторе. Осаждение покрытий в условиях низкого давления вакуума позволяет получать микротвёрдость поверхности деталей до 19,4 ГПа. Толщина покрытия равномерна по всей глубине и длине. Содержание в покрытии примесей в виде включений оксида хрома ухудшают его микротвёрдость.

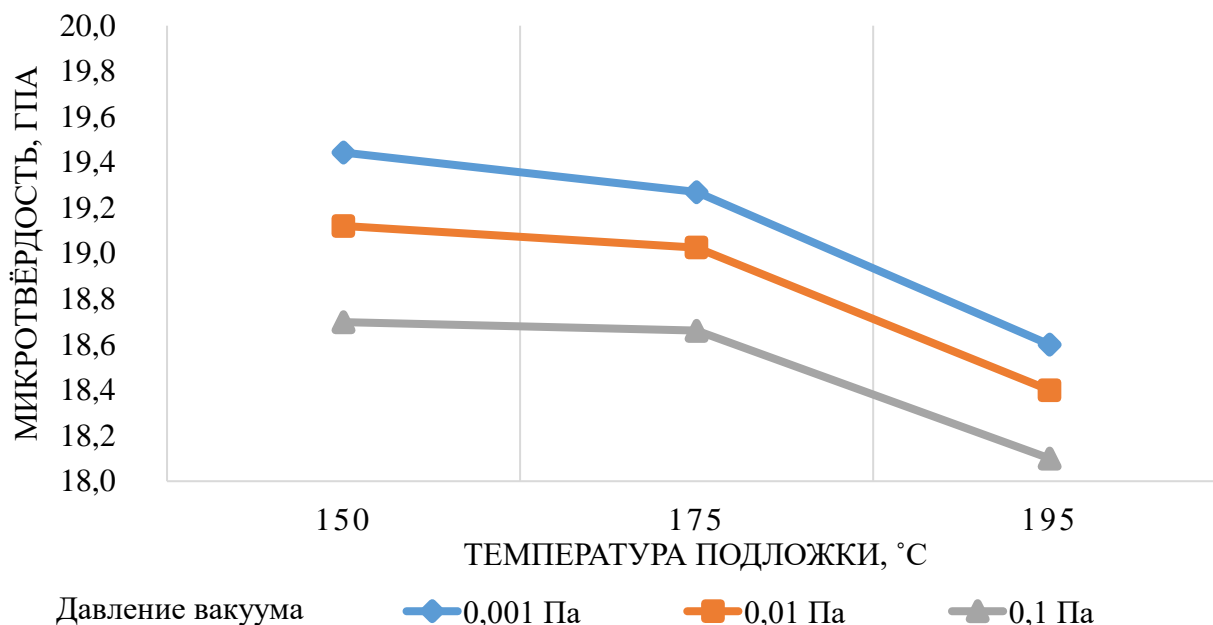


Рисунок 4.9 – Влияние давления вакуума на микротвёрдость карбидохромового покрытия при температурах подложки 150, 175 и 195°C и МОС 60°C при скорости подачи реакционной среды 1,5 л/час.

Таким образом, используемый температурный режим при восстановлении деталей распылителей форсунок не приводит к изменению структуры сталей. Экспериментально подтверждена возможность в получении карбидохромового покрытия на стальной подложке в условиях давления вакуума 0,1...0,001 Па и при температурах 150, 175 и 195°C. С увеличением степени вакуума снижается скорость роста покрытия, что позволяет получать его более свободным от примесей. Температурный режим подложки влияет на интенсивность разложения паров гексакарбонила хрома и скорость роста покрытия. Подача реакционной среды влияет на скорость роста покрытия и расход реактива.

4.2. Планирование эксперимента

Для определения оптимальных режимов осаждения карбидохромового покрытия проводилась серия предварительных экспериментов. Согласно данным главы 2 и 3 было установлено, что основными факторами, влияющими на

осаждение карбидохромового покрытия, являются: давление вакуума, температура подложки и скорость подачи карбонила в реакционную камеру. Оценкой эффективности выбора оптимального режима являлись технологические показатели: микротвёрдость и скорость роста покрытия. Следовательно, функция, определяющая оптимальный режим ведения металлизации, имеет вид:

$$y_i = f(X_1, X_2, X_3) + v \quad (4.1)$$

где y_i – регрессия, определяемый технологический параметр; f – неслучайная составляющая функции отклика, связывающая параметр оптимизации с факторами или функция регрессионной зависимости; X_1, X_2, X_3 – факторы влияющие на осаждение покрытия, соответственно, давление вакуума, температура подложки и скорость подачи карбонила; v – аддитивная случайная величина с нулевым математическим ожиданием, имеющая Гауссовское распределение, характеризуемая множеством неучтённых и непредсказуемых факторов, а также ошибки измерений зависимой переменной [2, 3, 9, 37, 92, 119, 140, 164, 180, 186, 212].

Многофакторные процессы при осаждении покрытия описываются зависимостью случайной величины от переменных действующих факторов, оцениваемых средними значениями независимо от истинного закона распределения, тогда уравнение функции отклика будет иметь следующий вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + v \quad (4.2)$$

где \hat{y} – случайная величина; b_0, b_1, b_2, b_3 – эмпирические коэффициенты уравнения регрессии.

Для анализа и описания нелинейных зависимостей используют методы регрессионного анализа. Задача регрессионного анализа заключается в поиске такой функции $f(x)$, которая описывает зависимость. Функция регрессии $y = f(x)$ может быть линейной или нелинейной. При линейной регрессии любое значение аргумента X вызывает одинаковое изменение функции y .

$$\hat{y} = a + b \cdot x + v \quad (4.3)$$

Если при одинаковых приращениях аргумента функция имеет неодинаковые изменения, то регрессия называется полиномиальной или криволинейной, в частном случае – это парабола:

$$\hat{y} = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + v \quad (4.4)$$

Для нахождения лучших эмпирических коэффициентов a и b функция $F(x)$ эффективности аппроксимации опытных данных должна быть наименьшей, следовательно:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i)^2 \Rightarrow \min \quad (4.5)$$

Для нахождения минимума функции $F(x)$ двух переменных a и b , пользуясь уравнением 4.3, возьмем две частные производные и приравняем их к нулю, получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dF(x)}{da} &= 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i)^1 \cdot (-1) = 0 \\ \frac{dF(x)}{db} &= 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i)^1 \cdot (-x_i) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

Преобразуем полученную систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a \cdot n + b \sum x_i &= \sum y_i \\ a \cdot \sum x_i + b \sum x_i^2 &= \sum y_i \cdot x_i \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Решая систему (5.6) по методу Крамера, получим:

$$a = \frac{\sum y_i \cdot \sum x_i^2 - \sum x_i \cdot \sum y_i x_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.8)$$

$$b = \frac{n \cdot \sum y_i x_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.9)$$

Для ортогональной матрицы ($\sum x_i = 0$) метод наименьших квадратов имеет вид:

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot \bar{y}_j \quad (4.10)$$

Факторы в физической системе имеют размерность и изменяются в диапазоне (x_{nj}, x_{oj}) . Описание искомой зависимости для области определения факторов осуществляют в нормированной системе координат:

$$x_j^o = \frac{x_j - x_{oj}}{J_j} \quad (4.11)$$

где x_j - текущее значение, x_{oj} - основной уровень и J_j - интервал варьирования фактора в физической системе.

Оценка наличия грубых ошибок в полученных данных проверяется гипотезой однородности ряда дисперсий. Для этого выбирают максимальное значение дисперсий из проведённых опытов и подсчитывают расчётное значение критерия Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{jmax}^2}{\sum S_j^2} \quad (4.12)$$

Дисперсия воспроизводимости, оценивающая точность определения показателя y , определяется выражением:

$$S_{\sigma}^2 = \frac{\sum S_j^2}{N} \quad (4.13)$$

Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости:

$$f_{\sigma} = N(n - 1) \quad (4.14)$$

Дисперсия адекватности представляет собой рассеивание опытных данных и определяется после определения значения отклика при заданных переменных по выражению:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_{ad}} \cdot \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (4.15)$$

где $f_{ad} = N - d - 1$ – число степеней свободы для дисперсии адекватности; d – количество независимых связей (для прямой $d=1$).

Оценку полученных уравнений производят при сравнении дисперсий воспроизводимости и адекватности с последующим определением расчётного и критического значения критерия Фишера, представляющего собой функцию плотности распределения отношения двух дисперсий, и далее сверяют с табличными критическими значениями, тогда:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_e^2} \quad (4.16)$$

$$F_{кр} \equiv F_{\alpha=0.05; f_{ad}; f_e} \quad (4.17)$$

При сравнении значений критерия Фишера, в случае если расчётное значение меньше критического, то сравниваемые дисперсии отличаются несущественно и модель адекватна. В случае если расчётное значение больше критического, то требуется провести дополнительные опыты.

Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии определяют по среднеквадратическому отклонению:

$$S_{a_i} = \sqrt{\frac{S_B^2}{N \cdot n}} \quad (4.18)$$

Оценка интервала варьирования определяется по значению критерия Стьюдента для каждого коэффициента при неизвестных с последующим определением критической точки распределения Стьюдента по таблице критических значений при $\alpha=0.05$, $k = N \cdot n$, тогда:

$$t_{pi} = \frac{a_i}{S_{a_i}} \quad (4.19)$$

$$t_{кр} \equiv t_{\alpha=0.05; k} \quad (4.20)$$

При сравнении значений критерия Стьюдента в случае если расчётное значение меньше критического, то следует увеличить интервал варьирования и повторить опыты [2, 3, 71, 79, 92, 119, 140, 164, 180, 186, 212].

После проведения предварительных исследований выявлены зависимости при изменении факторов в диапазоне установленных значений. Наиболее приемлемый интервал вариации изменяемых факторов представлен в таблице 4.1. Исходя из этого, задача планирования по определению оптимального режима сводится к определению и описанию оптимальной области, в которой осуществляется формирование карбидохромового покрытия при термическом разложении соединений гексакарбонила хрома.

План-матрица полного факторного эксперимента приведена в таблице 4.2. Область нормированного факторного пространства представляет собой куб и для проведения полной серии опытов требуется 8 опытов. Оценка качества получаемого покрытия происходила по его микротвёрдости $Y_{i(H)}$ и скорости формирования $Y_{j(V)}$.

Таблица 4.1 – Уровни варьирования действующих факторов.

Уровни	Давление вакуума, Па	Температура подложки, °С	Подача реакционной среды, л/час
	X_1	X_2	X_3
Нижний	10^{-3}	150	1
Верхний	10^{-1}	195	3
Основной	10^{-2}	172,5	2
Интервал варьирования	10^{-1}	22,5	1

Таблица 4.2 – План матрица полнофакторного эксперимента.

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	$Y_{i(H)}$	$Y_{j(V)}$
1	+	+	+	+	y_{i1}	y_{j1}
2	+	–	+	+	y_{i2}	y_{j2}
3	+	+	–	+	y_{i3}	y_{j3}
4	+	–	–	+	y_{i4}	y_{j4}
5	+	+	+	–	y_{i5}	y_{j5}
6	+	–	+	–	y_{i6}	y_{j6}
7	+	+	–	–	y_{i7}	y_{j7}
8	+	–	–	–	y_{i8}	y_{j8}

Уравнение регрессии, определяющая микротвёрдость и скорость формирования покрытия в зависимости от давления вакуума, температуры подложки и подачи реакционной среды имеет следующий вид:

$$y_{\text{ГПа}} = 3,642 - 0,008\ln X_1 - 0,143\ln X_2 - 0,024\ln X_3 + v \quad (4.21)$$

$$y_{\text{мкм/мин}} = -3,583 + 2,428X_1^{0,5} - 0,323X_2^{0,5} - 0,2X_3^{0,5} + v \quad (4.22)$$

Все коэффициенты уравнения значимы по уровню 0,05. Уравнение 4.21 объясняет 99,35% вариации зависимой переменной микротвёрдости покрытия. Стандартная ошибка оценки уравнения регрессии составляет 0,0127. При сравнении абсолютной величины ошибки со средним значением зависимой переменной 18,727 ГПа, то её доля равна 0,07%. Уравнение 4.22 объясняет 99,74% вариации переменной скорости осаждения покрытия. Стандартная ошибка оценки уравнения регрессии составляет 0,0183. Абсолютная величина ошибки со средним значением зависимой переменной 1,74 мкм/мин равна 1,1%. Следовательно, модели не нуждаются в совершенствовании.

Оценка значимости факторов, влияющих на формирование покрытия с заданной микротвёрдостью и скоростью роста, показывает (рисунок 4.10), что температура подложки и давление вакуума наиболее значимы. Менее значимым фактором является подача реакционной среды.

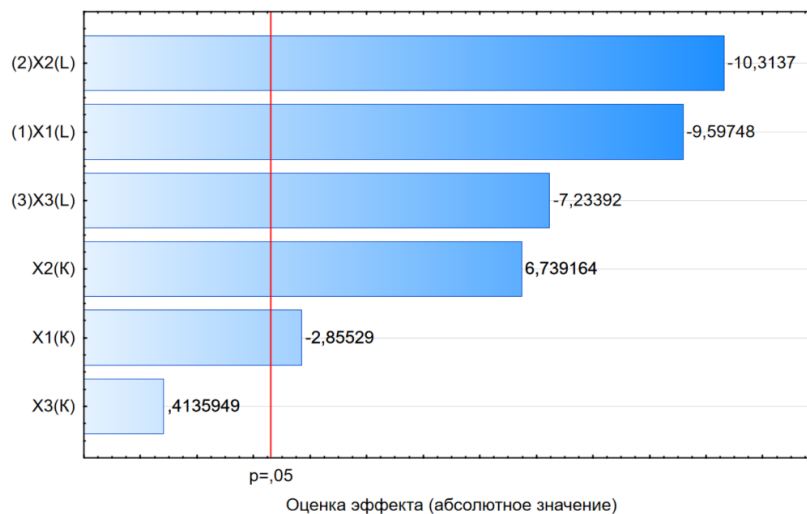


Рисунок 4.10 – Оценка значимости факторов на получение покрытия с высоким значением микротвёрдости: L – линейная; K – квадратичная.

Для выявления нестабильности дисперсии и ошибок в уравнениях построен график (рисунок 4.11) зависимости регрессионных остатков от вычисленного значения зависимой переменной микротвёрдости и скорости роста покрытия.

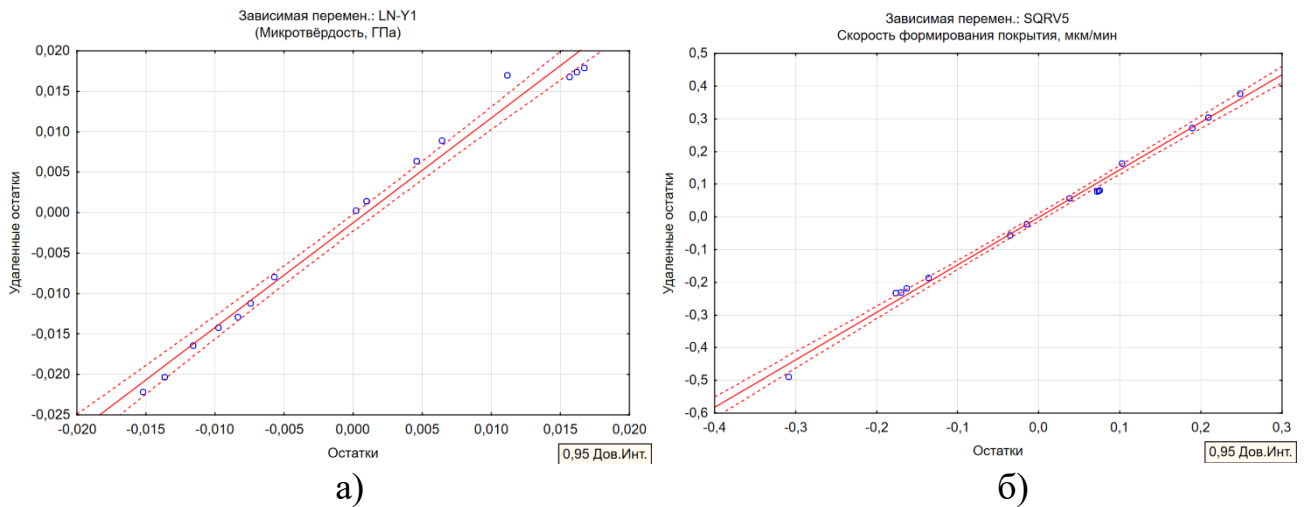


Рисунок 4.11 – Эмпирическое кумулятивное распределение:

а – микротвёрдость покрытия; б – скорость формирования покрытия.

Результирующий график остатков в линейной зависимости от предсказанных значений представлен на рисунке 4.12. Из него видно, что остатки хаотично расположены относительно прямой. Следовательно, математическая модель достаточно адекватно описывает данные.

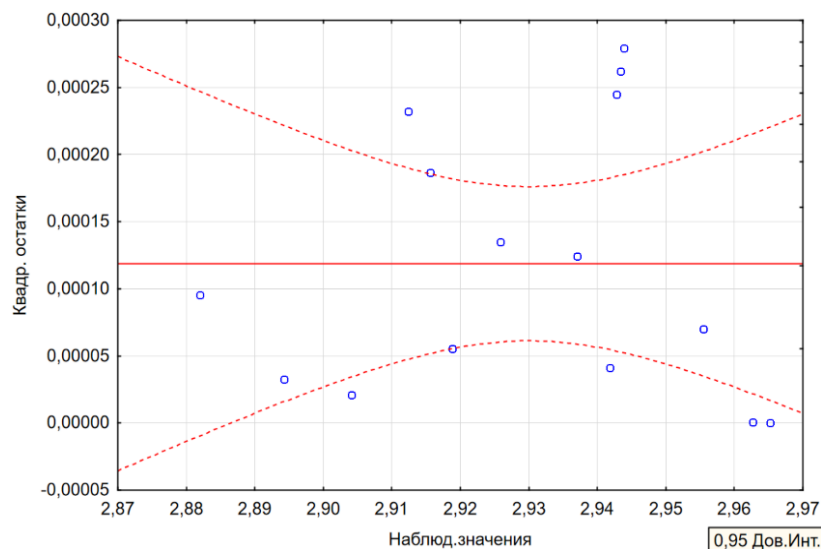


Рисунок 4.12 – Зависимость регрессионных остатков от предсказанных значений.

По проведённым исследованиям получены уравнения регрессии (4.20 – 4.21) и построены графики (рисунок 4.13 – 4.15).

Функция отклика зависимости изменения микротвёрдости от скорости роста покрытия и давления вакуума имеет вид:

$$H_{\text{ГПа}} = 19,42 + 38,16X_1 - 0,52V - 474,28X_1^2 + 6,83X_1V - 0,07V^2 \quad (4.23)$$

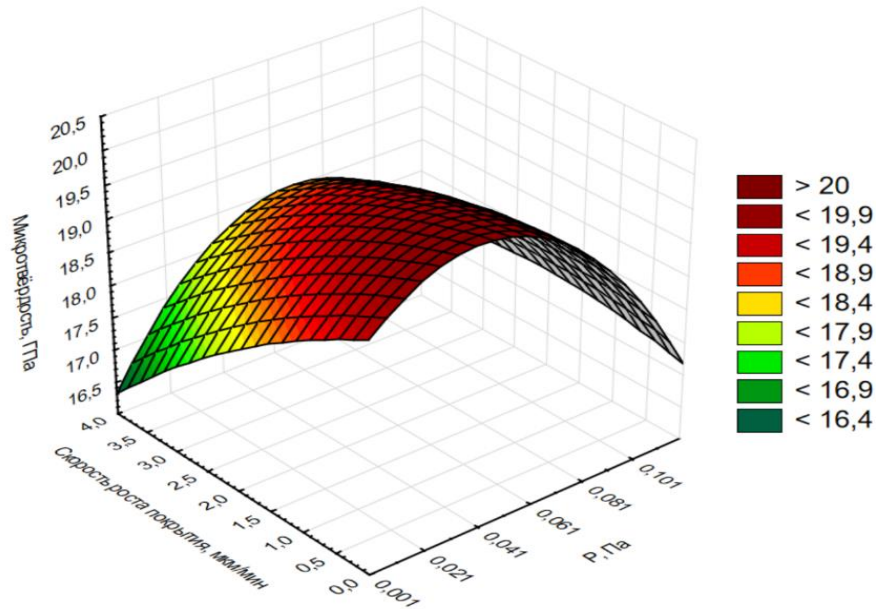


Рисунок 4.13 – Зависимость изменения микротвёрдости от скорости роста покрытия и давления вакуума.

Функция отклика зависимости изменения микротвёрдости от скорости роста покрытия и температуры подложки имеет вид:

$$H_{\text{ГПа}} = -4,61 + 0,3X_2 - 1,44V - 0,001X_2^2 + 0,007X_2V - 0,018V^2 \quad (4.24)$$

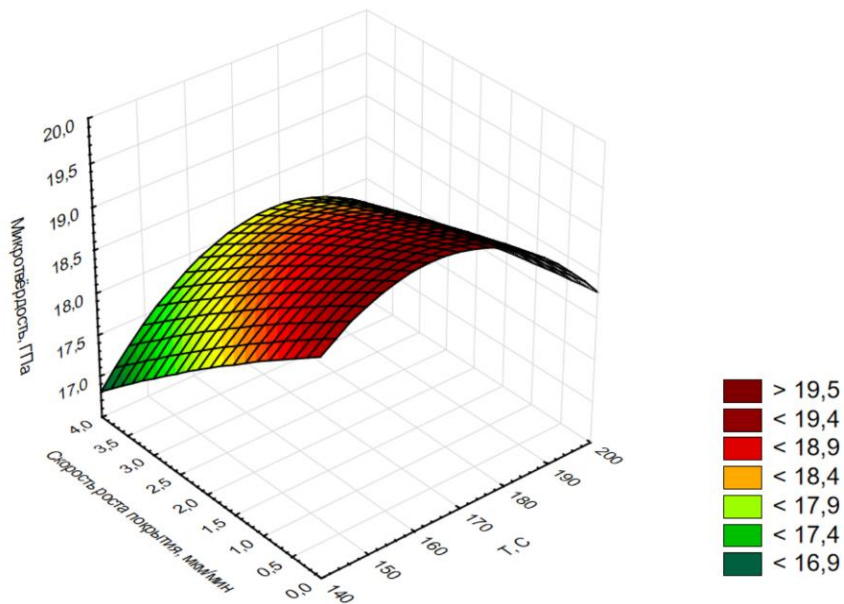


Рисунок 4.14 – Зависимость изменения микротвёрдости от скорости роста покрытия и температуры подложки.

Функция отклика зависимости изменения микротвёрдости от скорости роста покрытия и подачи реакционной среды имеет вид:

$$H_{\text{ГПа}} = 20,03 - 0,54X_3 - 0,42V + 0,11X_3^2 - 0,039X_3V + 0,041V^2 \quad (4.25)$$

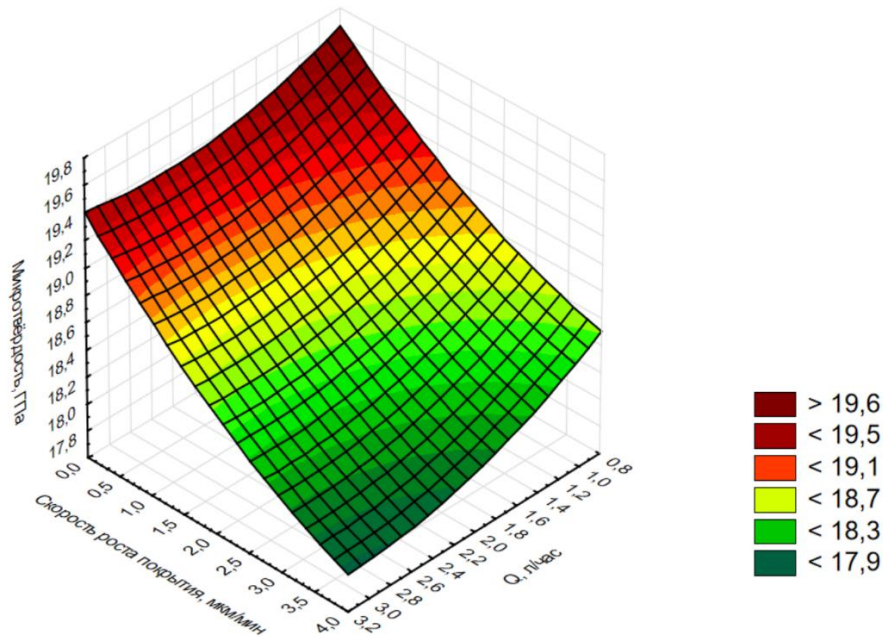


Рисунок 4.15 – Зависимость изменения микротвёрдости от скорости роста покрытия и подачи реакционной среды.

Таким образом, проверена статическая гипотеза о возможности управления CVD-процессом с получением требуемых заранее известных физико-механических свойств карбидохромовых покрытий, получаемых при термическом разложении соединений гексакарбонила хрома. Установлена взаимосвязь и зависимость факторов, влияющих на получение требуемых характеристик покрытия с максимальной производительностью технологического процесса для снижения себестоимости восстановления деталей, с помощью корреляционного и регрессивного анализа. Получены уравнения регрессии и построены графики функций отклика.

Для оптимизации технологического режима произведён срез параметрической модели при условии получения максимально возможной микротвёрдости покрытия с высокой скоростью его осаждения при минимальной подаче реакционной среды. На рисунке 4.16 показаны сечения поверхностей отклика в наиболее оптимальных значениях факторов в численных значениях.

Факторы связаны между собой вертикальной и горизонтальной проецируемыми линиями, которые определяют желательность в получении требуемой микротвёрдости и скорости формирования покрытия. Каждый фактор имеет свою функцию. Установлено, что при задаче технологическому режиму, обеспечивающему формирование покрытия, определённого значения одного фактора, изменяются оптимальные значения других, что приводит к качественному изменению свойств получаемых покрытий.

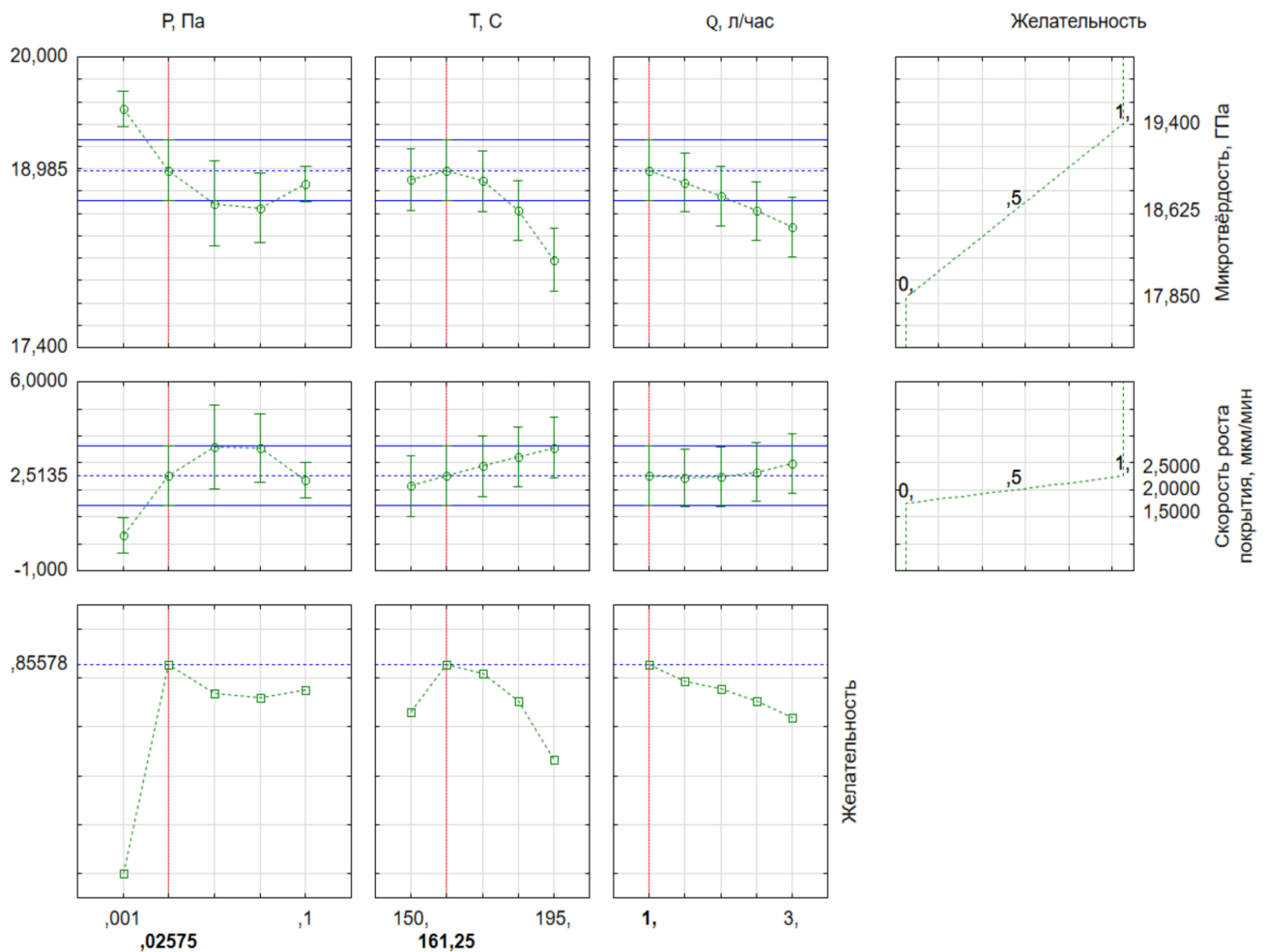


Рисунок 4.16 – Срез значений факторов с параметрической модели.

На основании этого оптимальный режим осаждения карбидохромового покрытия на стальные поверхности деталей распылителя форсунки будет при максимальных значениях микротвёрдости 18,98 ГПа и скорости роста 2,2 мкм/мин, что соответствует давлению вакуума 0,025 Па, температуре подложки 161 °С, подаче реакционной среды 1,0 л/час и температуре паров карбонила хрома 60 °С.

В соответствии с вышеизложенными данными построена оптимальная параметрическая модель (рисунок 4.17 – 4.19), которая позволяет увидеть и оценить влияние режима осаждения карбидохромового покрытия на требуемые к получению физико-механических свойств упрочняющего и износостойкого слоя из карбида хрома на стальных деталях распылителя.

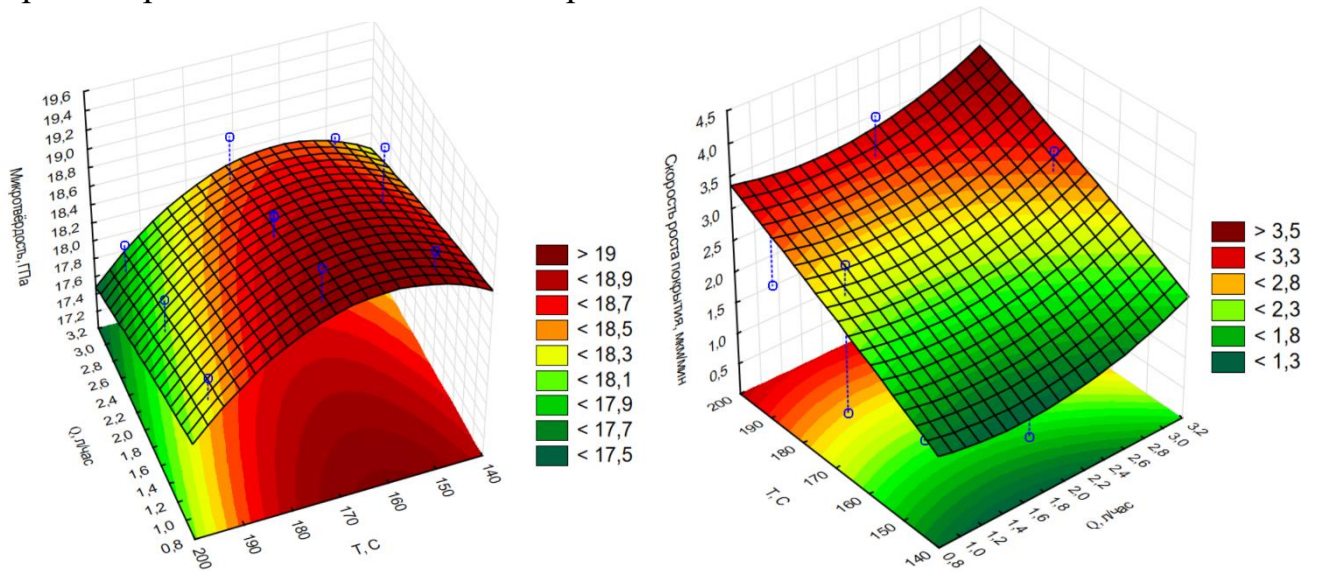


Рисунок 4.17 – Параметрическая модель прогнозирования микротвёрдости и скорости осаждения карбидохромового покрытия в зависимости от температуры подложки и подачи реакционной среды при постоянном давлении вакуума 0,025Па.

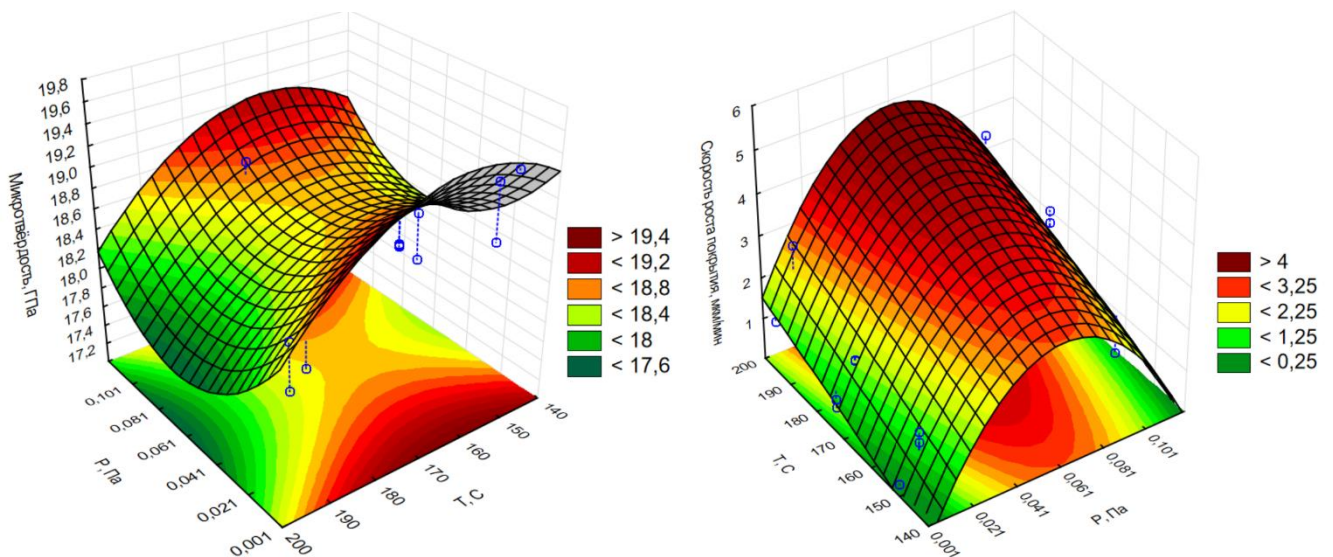


Рисунок 4.18 – Параметрическая модель прогнозирования микротвёрдости и скорости осаждения карбидохромового покрытия в зависимости от температуры подложки и давления вакуума при подаче реакционной среды 1 л/час.

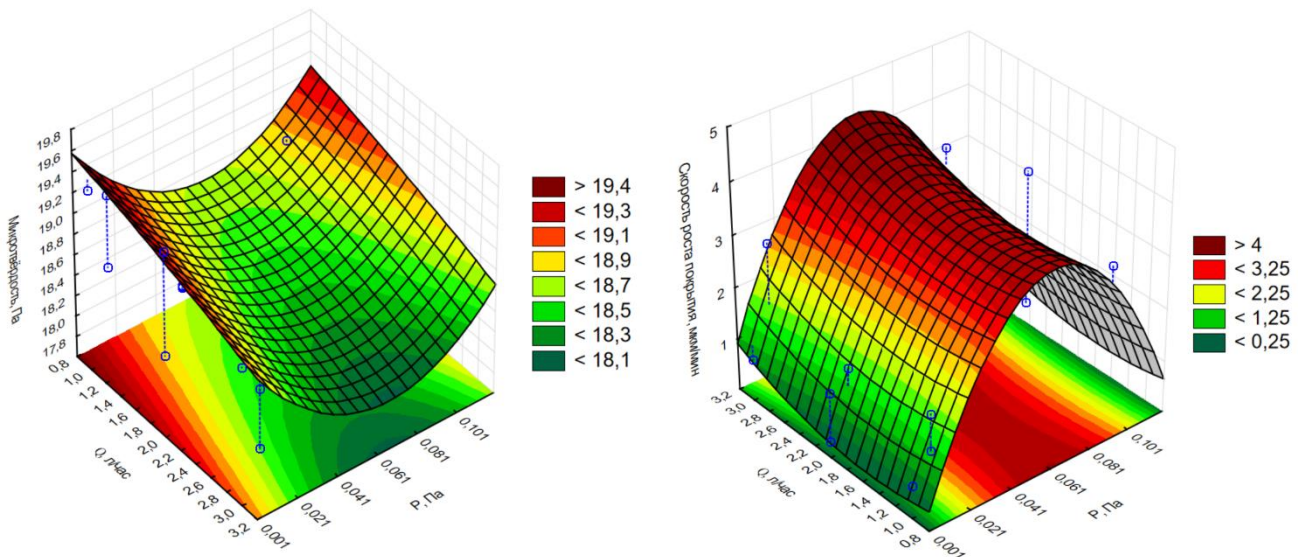


Рисунок 4.19 – Параметрическая модель прогнозирования микротвёрдости и скорости осаждения карбидохромового покрытия в зависимости от подачи реакционной среды и давления вакуума при температуре подложки 161 °С.

Вначале осаждения покрытия формируется адгезионный подслоя из карбида хрома путём заполнения микронеровностей, расположенных на восстанавливаемых поверхностях деталей распылителя. Этот процесс осуществляется при подаче реакционной среды 0,1 л/час и скорости роста покрытия 0,2 мкм/мин. Продолжительность – 2 минуты. Далее ведётся основное осаждение покрытия.

Осаждение карбидохромового покрытия в распыляющих отверстиях осуществляется при протяжке реакционной среды через них. Рост толщины покрытия в распыляющих отверстиях и в направляющей распылителя взаимосвязан. На рисунке 4.20 представлен график изменения диаметра распыляющих отверстий и направляющей корпуса распылителя в зависимости от продолжительности осаждения карбидохромового покрытия на оптимальном режиме.

Скорость роста карбидохромового покрытия в распыляющих отверстиях 6,8 мкм/мин. Время металлизации до восстановления геометрических размеров деталей распылителя при требуемой толщине покрытия на направляющей 45,625 мкм и распыляющих отверстий 139,45 мкм составляет 23 минуты.

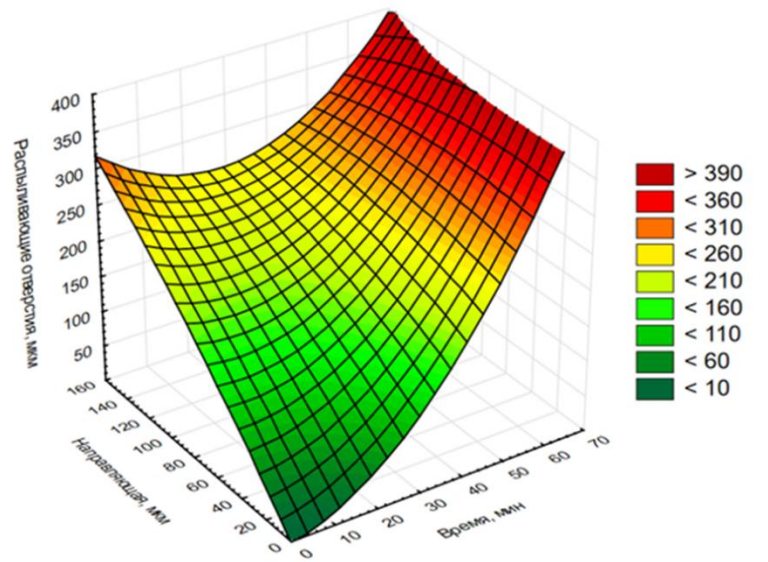


Рисунок 4.20 – Зависимость приращения диаметров проходного сечения распыляющих отверстий и направляющей корпуса распылителя от продолжительности металлизации.

Таким образом, установлен оптимальный режим и построена параметрическая модель осаждения карбидохромового покрытия на деталях распылителя форсунки при условии обеспечения максимальных значений микротвёрдости 18,98 ГПа и скорости роста в направляющей 2,2 мкм/мин и в распыляющих отверстиях 6,8 мкм/мин, что возможно при давлении вакуума 0,025Па, температуре подложки 161°С, подаче реакционной среды 1,0 л/час и температуре паров гексакарбонила хрома 60°С. Продолжительность восстановления геометрических размеров деталей при толщине покрытия 45,625 мкм на направляющей и 139,45 мкм на распыляющих отверстиях составляет 23 минуты. Коэффициент использования реактива более 80%.

4.3. Исследование микротвёрдости карбидохромового покрытия

Исследование микротвёрдости покрытия полученного при давлении вакуума 0,025Па, температуре подложки 161°С, скорости подачи реакционной среды 1,0 л/час и температуре паров гексакарбонила хрома 60 °С проводили при нагрузке 1,0 и 0,2Н (рисунок 4.21 и 4.22), согласно методикам [16, 26, 95, 174]. Глубина отпечатка индентера при нагрузке 1Н (рисунок 4.21) на подложке 9,3 мкм, а на

карбидохромовом покрытии 5,6 мкм. Отношение отпечатков диагоналей индентора при замере микротвёрдости образца и карбидохромового покрытия составляет в 1,65 раза.

Микротвёрдость полученного карбидохромового покрытия на поверхности стали 12Х2Н4А составляет 18,96 ГПа, что выше значений микротвёрдости серийных деталей распылителя форсунки на 11,1...11,6 ГПа или в 2,42...2,58 раза и выше минимальной, установленного теоретически 16,8 ГПа, на 2,16 ГПа. Однако, микротвёрдость полученного покрытия по отношению к планируемому 18,98 ГПа меньше на 0,1%, что связано с погрешностью измерений.

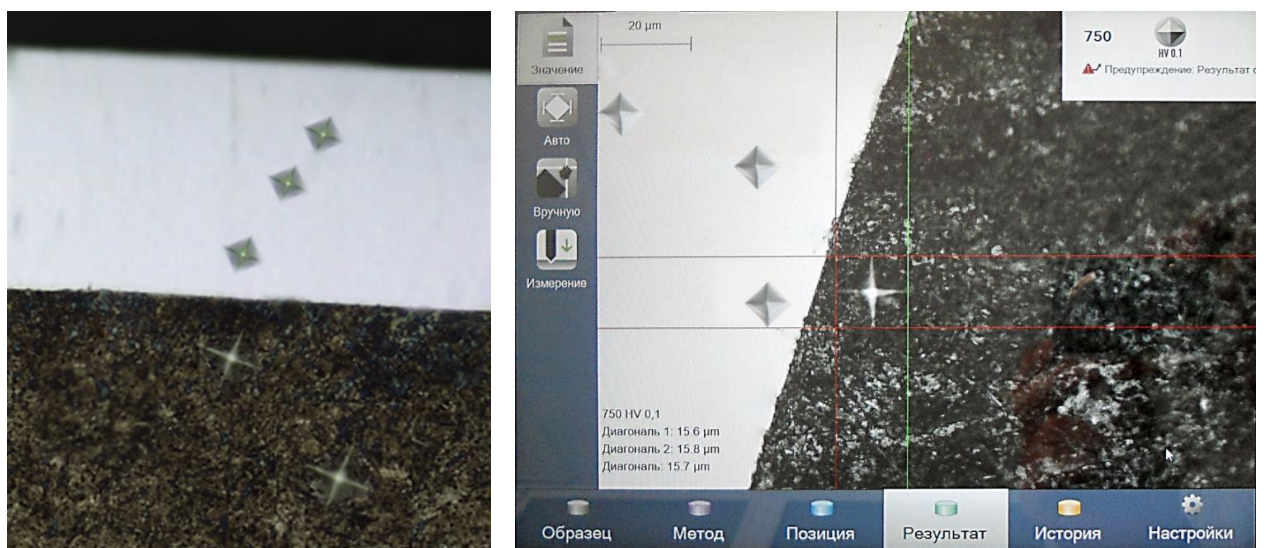


Рисунок 4.21 – Определение микротвёрдости карбидохромового покрытия и подложки при нагрузке 1Н после парофазной металлизации при давлении вакуума 0,025Па, скорости подачи реакционной среды 1,0 л/час температур подложки 161 °С и паров гексакарбонила хрома 60 °С.

В целях проверки несущей способности карбидохромового покрытия, предназначенного для упрочнения серийных деталей, проверку вели с нагрузкой 0,2 Н (рисунок 4.22) при толщине карбидохромового слоя 5 и 2 мкм. Глубина внедрения индентора в покрытие при его толщине 5 мкм составила 2,7 мкм, и при этом наблюдается ровный отпечаток. При толщине покрытия 2 мкм происходит его пролом по периметру индентора с образованием радиальных трещин. Следовательно, оптимальная толщина покрытия на новых серийно выпускаемых прецизионных деталях должна быть не менее 5 мкм, что обеспечит высокую его

надёжность. Продолжительность осаждения карбидохромового покрытия с толщиной 5 мкм составит до четырёх минут.

В сопоставлении прилагаемой нагрузке 0,2Н соответствует сила разрушения абразивной частицы корунда диаметром 5 мкм или кварца 8 мкм, что больше максимального конструкторского допуска в направляющей части распылителя форсунки в 1,25 и 2 раза. Шероховатость поверхности покрытия Ra0,05.

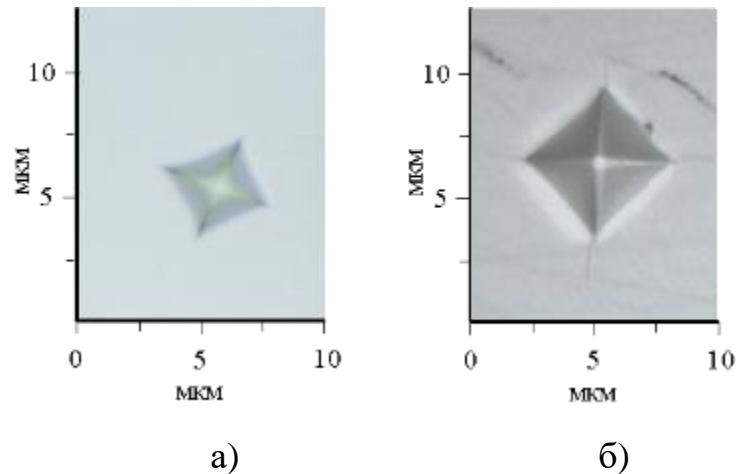


Рисунок 4.22 – Отпечаток от индентора на карбидохромовом покрытии после приложенной нагрузки 0,2Н:

а) – толщина покрытия 5 мкм; б) – толщина покрытия 2 мкм.

Корпус и игла распылителя форсунки после выведения следов износа подлежали к восстановлению геометрических размеров карбидохромовым покрытием (рисунок 4.23).

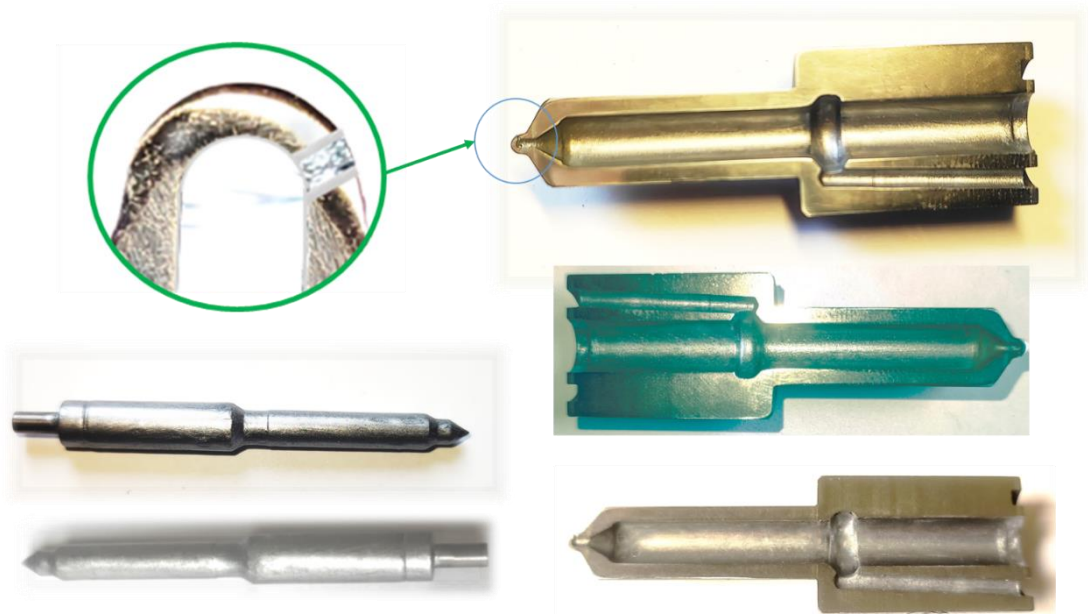


Рисунок 4.23 – Внешний вид восстановленных деталей распылителя форсунки.

Таким образом, осаждение карбидохромового покрытия при давлении вакуума 0,025 Па, температуре подложки 161 °С, скорости подачи реакционной среды 1,0 л/час и температуре паров гексакарбонила хрома 60 °С позволяет получать на стальных поверхностях распылителя форсунки износостойкий слой микротвёрдостью 18,96 ГПа и шероховатостью поверхности Ra0,05. При этом микротвёрдость покрытия равномерна по всей толщине и длине.

4.4. Рентгеноструктурный и масс-спектральный анализы покрытий

Для подтверждения результатов металлографических исследований был проведён рентгеноструктурный и масс-спектральный анализ опытных образцов.

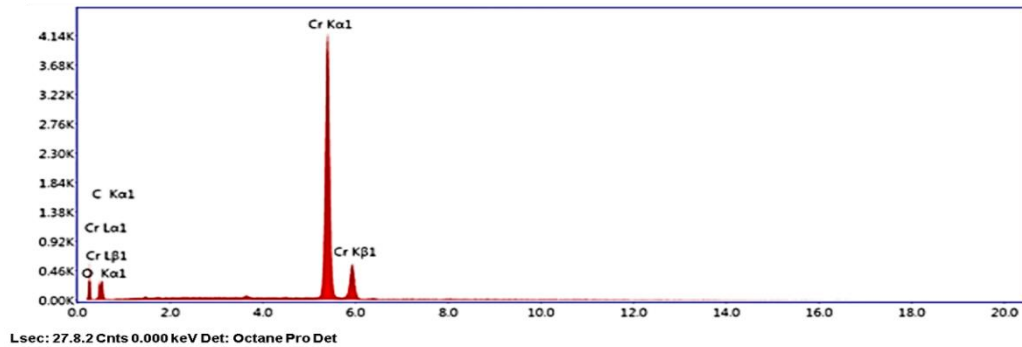
Для анализа были приняты следующие образцы:

- сталь 12Х2Н4А с толщиной покрытия 270 мкм, полученного при давлении вакуума 0,1 Па, температуре подложки 195 °С и реакционной среды 60 °С, скорость подачи реакционной среды 3,0 л/час;
- сталь Р6М5 с толщиной покрытия 105 мкм, полученного при давлении вакуума 0,01 Па, температуре подложки 175 °С и реакционной среды 60 °С, скорость подачи реакционной среды 2,0 л/час;
- сталь Р6М5 с толщиной покрытия 10 мкм, полученного при давлении вакуума 0,001 Па, температуре подложки 150 °С и реакционной среды 60 °С, скорость подачи реакционной среды 1,0 л/час;
- сталь Р6М5 с толщиной покрытия 45 мкм, полученного при давлении вакуума 0,025 Па, температуре подложки 161 °С и реакционной среды 60 °С, скорость подачи реакционной среды 1,0 л/час.

Результаты рентгеноструктурного анализа представленные в таблице 4.3, и они подтверждают осаждение карбида хрома на поверхности стальной подложки. Результат масс-спектрального анализа покрытия представлен на рисунке 4.24, и он показывает массовое отношение химических элементов, входящих в состав карбидохромового покрытия.

Таблица 4.3 – Результаты послойного рентгеноструктурного анализа карбидохромового покрытия.

№ п/п	Глубина слоя, мкм	Состав карбидохромового покрытия			
		1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
1	С поверхности	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$
2	25	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$
3	50	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
4	75	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
5	100	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
6	125	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
7	150	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
8	175	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
9	200	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
10	225	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
11	250	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
12	272	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$
13	300	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$	$\text{Fe}\alpha$



Sample №1									
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	26.74	53.13	168.29	4.19	0.12	1.09	0.96	0.41	1
O K	17.62	22.41	74.34	12.15	0.03	1.19	1.07	0.28	1.09
Cr K	55.64	24.46	3,487.56	2.17	0.53	0.99	1.14	1.08	1.16

Sample №2									
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	32,23	62,65	189.37	5.56	0.14	1.13	0.92	0.38	1
O K	1,56	5,86	59.76	10.91	0.01	1.15	0.97	0.23	1.04
Cr K	66,21	31,49	3,865.38	1.4	0.56	0.93	1.09	1.05	1.05

Sample №3									
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	33,09	66,17	208.17	3.19	0.17	1.15	0.88	0.33	1
O K	0,18	0,04	29.16	7.15	0.01	1.03	0.9	0.19	1
Cr K	66,73	33,79	4,319.56	1.1	0.54	0.9	1.01	1	1.01

Sample №4									
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	33.23	66.52	198.83	6.12	0.15	1.15	0.9	0.36	1
O K	1.03	1.01	39.16	9.13	0.01	1.11	0.93	0.21	1
Cr K	65.74	32.47	3,967.75	1.3	0.59	0.9	1.04	1.02	1.01

Рисунок 4.24 – Результат масс-спектрального анализа покрытий на образцах соответственно по вариантам.

Результат рентгеноструктурного анализа установил, что карбидохромовое покрытие, получаемое с помощью термического разложения соединений гексакарбонила хрома в интервале давления вакуума $0,1 \dots 0,001$ Па и температуры осаждения ниже 200 °С, состоит в основном из карбида хрома Cr_3C_2 , в котором присутствуют примеси оксида хрома Cr_2O_3 .

Анализируя результаты масс-спектрального анализа состава карбидохромового покрытия, полученные при разных режимах осаждения, можно сделать вывод, что во всех случаях единственным отличием является состав покрытия. На упрочняемом образце при давлении вакуума $0,001$ Па наблюдается наименьшая концентрация кислорода $0,18\%$, чем у образца с покрытием, полученном при давлении вакуума $0,1$ Па – $17,62\%$.

4.5. Остаточные напряжения

Исследовано влияние температуры ведения металлизации и толщины карбидохромового покрытия на величину остаточных напряжений (рисунок 4.25).

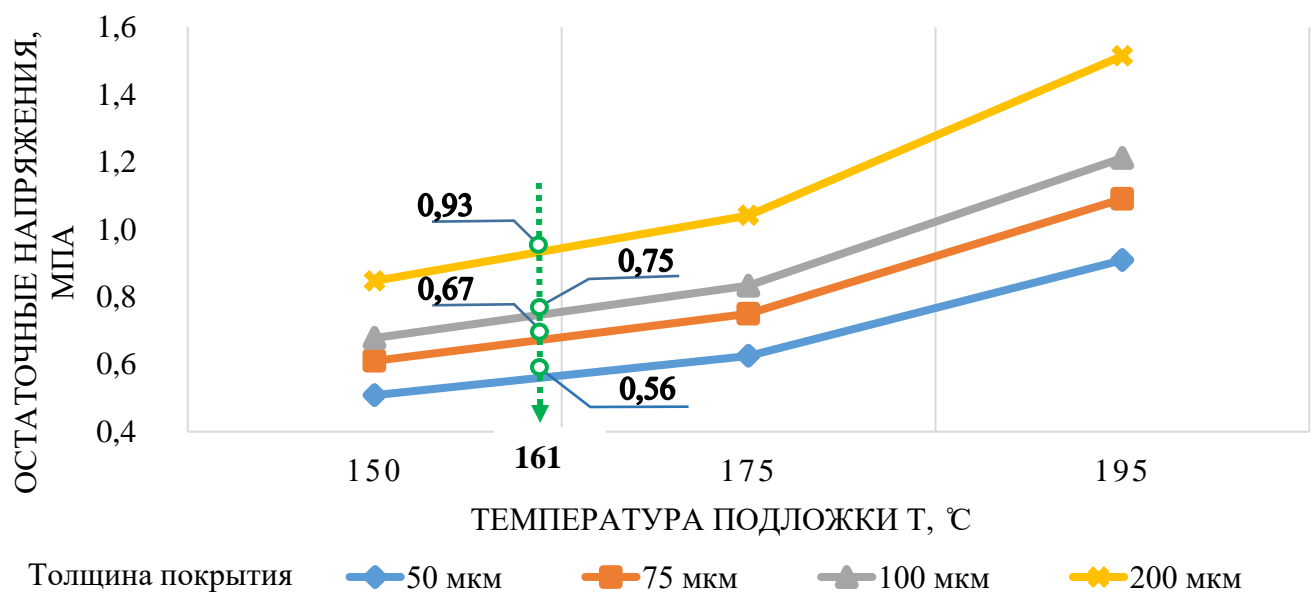


Рисунок 4.25 – Влияние температуры подложки на остаточные напряжения в карбидохромовых покрытиях различной толщины, полученных при давлении вакуума $0,025$ Па, скорости подачи реакционной среды $1,0$ л/час, температур подложки 161 °С и паров гексакарбонила хрома 60 °С.

Установлено, что ведение металлизации при постоянном давлении вакуума с понижением температуры подложки приводит к снижению содержания в покрытии остаточных напряжений. Основная причина — это снижение напряжений сжатия, возникающих в результате температурного расширения стали.

Однако с увеличением толщины карбидохромового покрытия увеличиваются остаточные напряжения в его структуре. Это связано с накоплением в нём примесей, входящих в состав покрытия и образуемых в результате термодинамических реакций, сопровождающихся образованием карбида хрома на поверхности подложки.

Таким образом, предложенный оптимальный режим нанесения карбидохромового покрытия CVD-методом позволяет уменьшить остаточные напряжения в 2,7...4,8 раза в сравнении с ранее исследованными работами [213, 214, 229, 230]. При толщине покрытия 50 мкм остаточные напряжения равны 0,56 МПа, при 100 мкм – 0,75 МПа.

4.6. Сцепляемость покрытия с подложкой

Работоспособность деталей, восстановленных упрочняющими покрытиями, во многом зависит от прочности сцепления покрытия с металлом [102]. Характеристика покрытий по прочности сцеплений сравнивается с прочностями основного материала на разрыв [145].

Хромовые покрытия с высокой адгезией трудно получить при электролитическом осаждении на закалённых или неподготовленных углеродистых и конструкционных сталях [90, 199, 203]. Поэтому в целях обеспечения высоких её значений электролитический способ часто комбинируется с диффузионной металлизацией [90, 102, 154] и другие работы. Наряду с этим, увеличивается трудоёмкость технологии восстановления деталей в ремонтном производстве за счёт введения дополнительных технологических операций.

В настоящей работе адгезия покрытия с подложкой обеспечивается за счёт комплексной подготовки поверхности деталей путём очистки, задачи

шероховатости, травления, дегазации поверхности и формирования подслоя. Последняя операция осуществляется за счёт подачи реакционной среды гексакарбонила хрома в реактор CVD-установки с более низкой скоростью до 10% от номинальной, чем при основном режиме. Адгезия карбидохромового покрытия при толщине 100 мкм составила 34 МПа, полученного в режиме: давление вакуума 0,025Па, скорость подачи реакционной среды 1,0 л/час, температуры подложки 161 °С и паров гексакарбонила хрома 60 °С. Полученный результат согласуется с работой [230], но в отличие от неё осаждение карбида хрома проводили на поверхности стальной детали с шероховатостью Ra0,2 мкм. На рисунке 4.26 приведён сравнительный анализ значений адгезии при электролитическом, химическом и диффузионном хромировании.

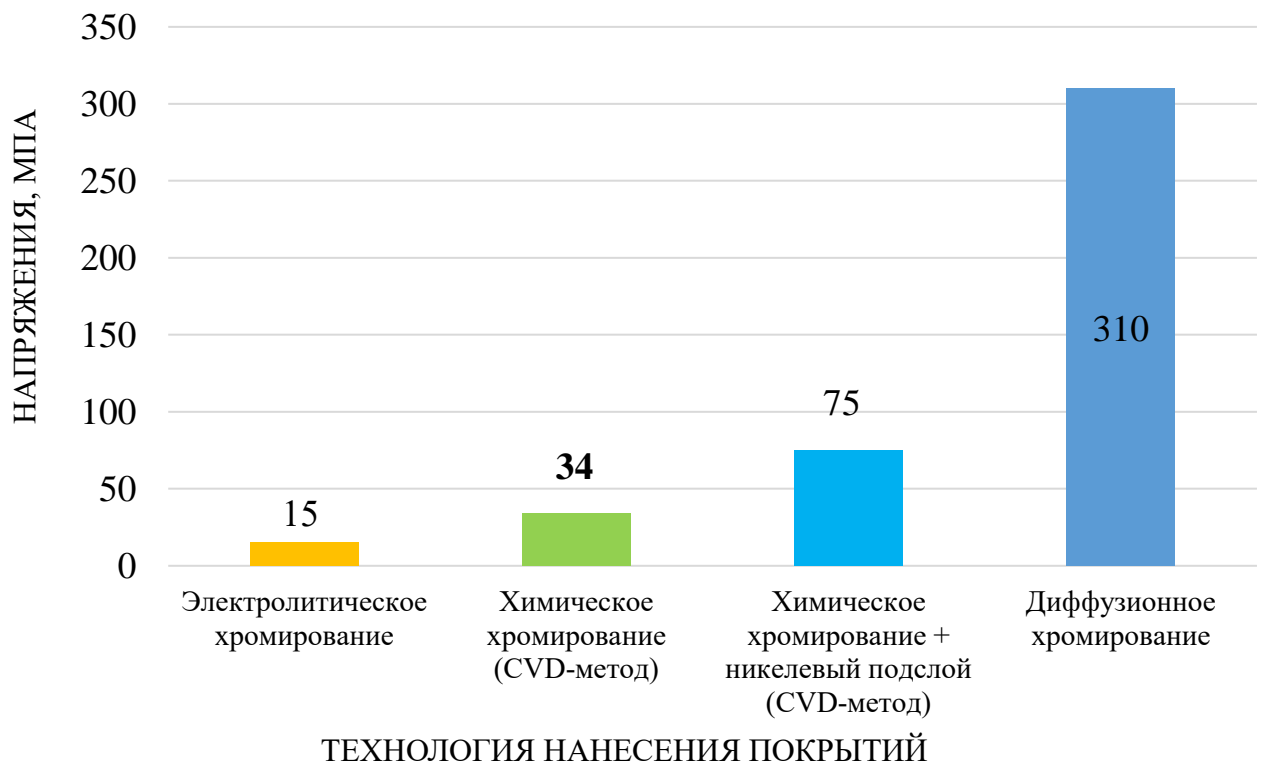


Рисунок 4.26 – Сравнительная оценка адгезии хромовых покрытий при различных способах восстановления поверхностей.

Карбидохромовые покрытия, полученные CVD-способом, обладают большей сцепляемостью с подложкой в сравнении с электролитическим хромированием более чем в 2,3 раза и меньше в 9,1 раза при диффузионном

хромировании. Однако, при формировании никелевого адгезионного подслоя, сцепляемость карбидохромового покрытия с подложкой увеличивается в 2,2 раза [114]. Электролитическая металлизация позволяет обеспечить достаточную адгезию, но наряду с низкой микротвёрдостью покрытия, эта технология невозможна к применению для восстановления распылителей форсунок. Диффузионная металлизация обладает избыточной сцепляемостью [20, 102].

Наряду с этим адгезионная связь покрытия с подложкой способствует снижению интенсивности коррозионного процесса, степень которой зависит от агрессивности среды и качества покрытия.

4.7. Износостойкость покрытий

Образцы сталей, применяемых при изготовлении распылителей форсунок, с карбидохромовыми покрытиями и без него испытывали в лабораторных условиях.

К испытаниям подлежали четыре вида образцов типа «диск»:

1. образец, изготовленный из стали 12Х2Н4А ГОСТ 4543 [63] с цементацией и закалкой до 61...63 HRC;
2. образец, изготовленный из стали Р6М5 ГОСТ 19265 [55] с объёмной закалкой до 62...64 HRC;
3. образец, изготовленный из стали 12Х2Н4А ГОСТ 4543 [63] с нанесённым карбидохромовым покрытием толщиной 100 мкм и микротвёрдостью 18,96 ГПа;
4. образец, изготовленный из стали Р6М5 ГОСТ 19265 [55] с нанесённым карбидохромовым покрытием толщиной 100 мкм и микротвёрдостью 19,4 ГПа.

На рисунке 4.27 представлены значения износа, прошедших испытания образцов, которые оценивались взвешиванием пар трения по результату прохождения полного цикла испытаний. Величина износа с увеличением микротвёрдости поверхности снижается. Относительная износостойкость упрочнённых образцов к неупрочнённым составила 4,1...5,0 раза.

Установлено, что интенсивность изнашивания образцов с карбидохромовым покрытием ниже, чем без него. Износ образцов сталей 12Х2Н4А и Р6М5 без

упрочняющего покрытия практически одинаков, так как имеют сравнительно равную микротвёрдость поверхностей. После испытаний на этих поверхностях наблюдается множество продольных борозд, царапин и вырвов, образованных в результате абразивного изнашивания и схватывания.

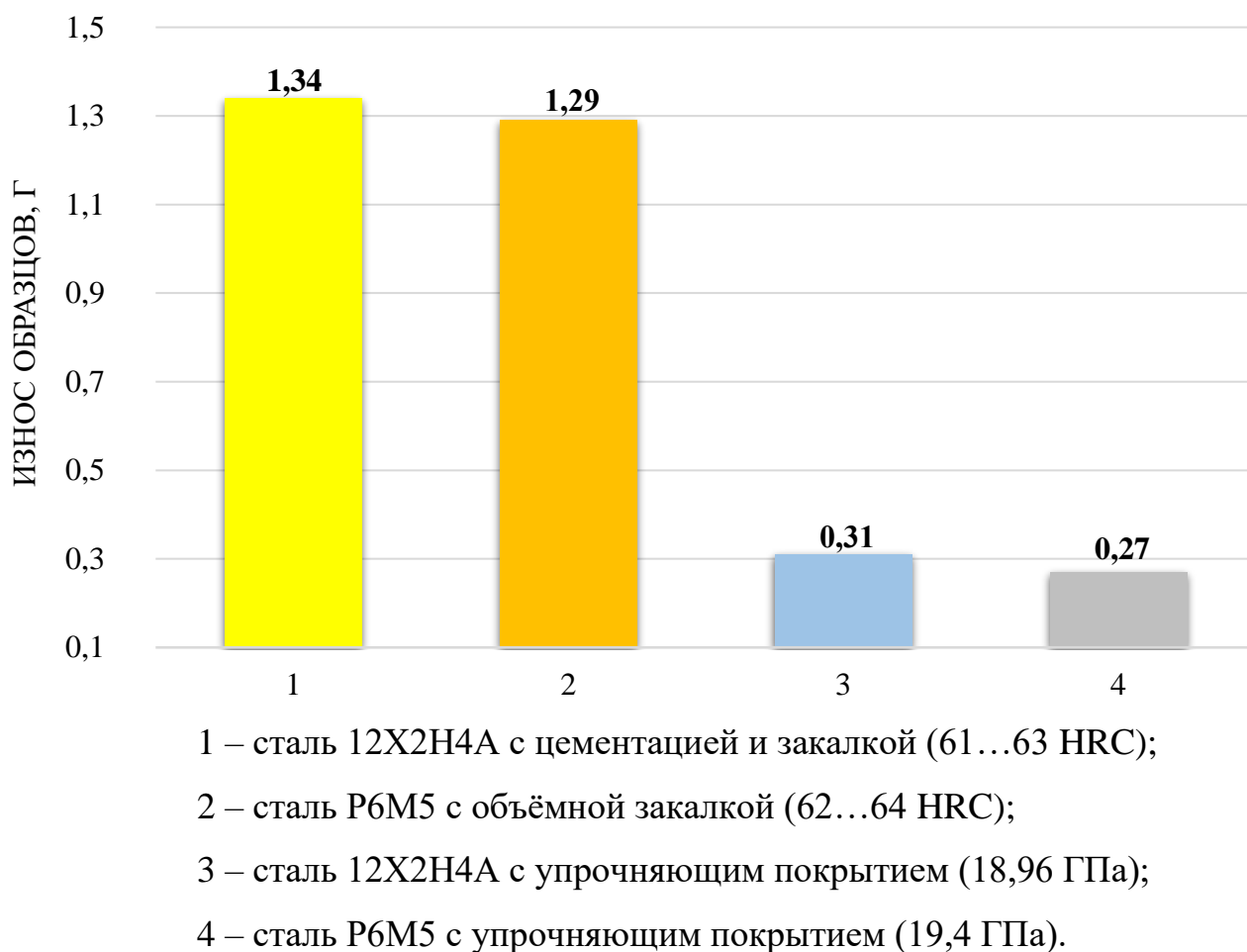


Рисунок 4.27 – Износ образцов, прошедших испытания на изнашивание.

По результату испытаний у образцов 3 и 4 нет явных отличий по износу, так как отсутствуют риски, борозды, сколы и другие дефекты. Упрочняющее покрытие позволило исключить повреждение поверхностей частицами кварца, присутствующими в зоне трения, а, следовательно, его можно рекомендовать для упрочнения деталей, подверженных к воздействию абразивных частиц кварца. При восстановлении и упрочнении деталей целесообразно осаждать на поверхностях иглы и корпуса распылителя форсунки карбидохромовые покрытия с микротвёрдостью 18,96 ГПа, так как их формирование осуществляется при

меньших энергетических затратах и с большей производительностью, чем требуется для получения микротвёрдости 19,4 ГПа.

Таким образом, износ поверхностей трения будет минимален при упрочнении обоих деталей прецизионного сопряжения распылителя форсунки. Оптимальная микротвёрдость покрытия 18,96 ГПа.

4.8. Исследование коррозионной стойкости

Сталь и её сплавы имеют низкую коррозионную стойкость. В связи с этим разработано многочисленное количество способов и методов защиты металла [199]. Наибольшее распространение получили способы, которые позволяют наносить защитные покрытия, имеющие в своём составе электроотрицательный металл с более низким электрохимическим потенциалом, например, хром, цинк, алюминий и другие, чем сам железоуглеродистый сплав.

Известно, что парофазная химическая металлизация углеродистых сталей приводит к существенному повышению коррозионной стойкости в агрессивных средах. В данной работе были проведены исследования по сравнению коррозионной стойкости образцов из сталей 12Х2Н4А и Р6М5. На сталь Р6М5 наносили упрочняющее карбидохромовое покрытие, полученное при давлении вакуума 0,025Па, скорости подачи реакционной среды 1,0 л/час, температуры подложки 161 °С и паров гексакарбонила хрома 60 °С. Результаты исследования показаны на рисунках 4.28 и 4.29.

В растворах азотной и серной кислоты потеря массы образца с карбидохромовым покрытием составила к 100 ч испытаний 4,2 г/см², что в 3,5 раза меньше потери массы образца из стали Р6М5 и в 4 раза меньше, чем у 12Х2Н4А. В растворе 10% щёлочи потеря массы образца с карбидохромовым покрытием составила к 75 ч испытаний 0,8 г/см², что в 7,8 раза меньше потери массы образца из стали Р6М5 без покрытия и 8,75 раза меньше, чем у 12Х2Н4А.

Таким образом, осаждение карбидохромового покрытия на сталях 12Х2Н4А и Р6М5 приводит к повышению коррозионной стойкости образцов в кислой среде в

3,5...4 раза, в щелочной – в 6...7 раз. Это позволяет рекомендовать карбидохромовые покрытия для упрочнения деталей топливной аппаратуры, что позволит смягчить требования к рН дизельного топлива.

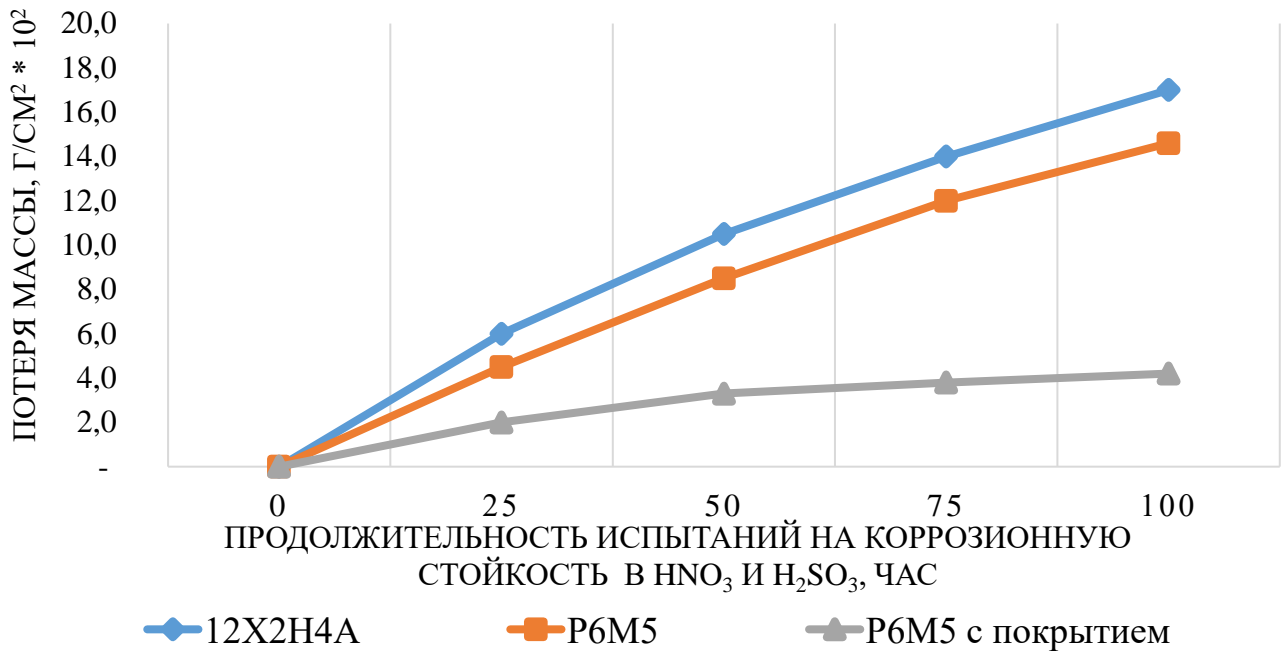


Рисунок 4.28 – Испытания на коррозионную стойкость образцов сталей 12X2H4A, P6M5 и сталь P6M5 защищённая карбидохромовым покрытием в коррозионной среде азотной и серной 10% кислоты.

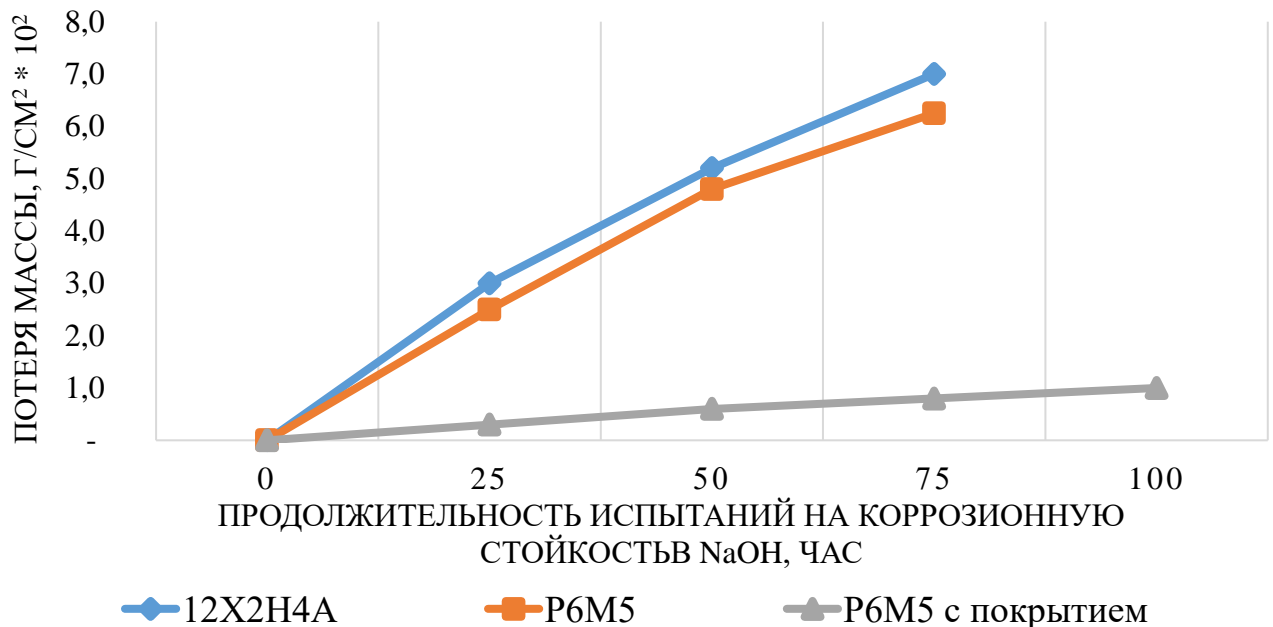


Рисунок 4.29 – Испытания на коррозионную стойкость образцов сталей 12X2H4A, P6M5 и сталь P6M5, защищённую карбидохромовым покрытием в коррозионной среде в 10% растворе щёлочи NaOH.

4.9. Эксплуатационные испытания распылителей форсунок

В текущей работе эксплуатационные испытания по оценке надёжности топливных форсунок автотракторных дизелей типа ФД-22 с распылителями, восстановленными карбидохромовыми покрытиями, проводились на моделях 39.1112010-05, 171.1112010-01 и 261.1112010-11, предназначенных для двигателей, соответственно, Д-240 трактора МТЗ-80, Д-243 трактора МТЗ-82.1 и ЯМЗ-236/238 трактора ХТЗ Т-150К. Всего к испытаниям было подвергнуто 22 распылителя.

За наблюдаемый период с момента начала проведения испытаний с марта 2023 по август 2023 отказов не наблюдалось. Трактора эксплуатировались в полевых условиях на посевных, кормозаготовительных и транспортировочных работах. Нарботка форсунок составила в среднем 575 мото-ч. Эксплуатационные испытания продолжаются.

Таким образом, промежуточные результаты проводимых эксплуатационных испытаний свидетельствуют о высокой надёжности восстановленных распылителей форсунок карбидохромовыми покрытиями.

4.10. Выводы

1. Установлено, что применяемый температурный режим при восстановлении деталей распылителей форсунок не приводит к изменению структуры сталей.
2. С повышением давления вакуума и понижением температуры подложки снижается количество примесей в карбидохромовом покрытии, что улучшает его микроструктуру и снижает скорость осаждения покрытия.
3. Покрытия, полученные в условиях низкого давления вакуума, имеют микротвёрдость до 19,4 ГПа и шероховатость поверхности Ra0,05. При этом микротвёрдость покрытия равномерна по всей толщине и длине.
4. Оптимальный режим осаждения покрытия, обеспечивающий наибольшую микротвёрдость 18,96 ГПа и максимальную скорость роста покрытия в направляющей 2,2 мкм/мин и в распыляющих отверстиях 6,8 мкм/мин, при давлении вакуума 0,025Па, подаче реакционной среды 1,0 л/час и температурах

подложки 161°C и паров гексакарбонила хрома 60°C . Продолжительность металлизации при восстановлении геометрических размеров – 23 минуты, а при серийном выпуске новых упрочнённых деталей – 4 минуты.

5. Оптимальная толщина покрытия на новых серийно выпускаемых прецизионных деталях не менее 5 мкм.

6. Рентгеноструктурным анализом установлено, что покрытие, получаемое с помощью термического разложения соединений гексакарбонила хрома в интервале давления вакуума $0,1 \dots 0,001$ Па и температуре осаждения ниже 200°C , состоит в основном из карбида хрома Cr_3C_2 , в котором присутствуют примеси оксида хрома Cr_2O_3 .

7. Масс-спектрическим анализом установлено, что наибольшая концентрация карбида хрома и меньшая примесей наблюдается на образце с покрытием, полученным при давлении вакуума $0,001$ Па, а большая на образце при давлении вакуума $0,1$ Па.

8. Установлено, что с увеличением температуры подложки и толщины покрытия в нём увеличиваются остаточные напряжения. При толщине 50 мкм остаточные напряжения составляют $0,56$ МПа, а при 100 мкм – $0,75$ МПа.

9. Сцепляемость карбидохромового покрытия составила 34 МПа.

10. Оптимально упрочнять обе детали прецизионного сопряжения. Относительная износостойкость упрочнённых образцов к неупрочнённым составляет $4,1 \dots 5,0$ раза. Нарботка упрочнённых распылителей форсунок при эксплуатации их на дизелях составит не менее 10 000 мото-ч, что выше в 2,5 раза в сравнение с серийными.

11. Упрочнение деталей карбидохромовыми покрытиями приводит к повышению коррозионной стойкости сталей в кислой среде в $3,5 \dots 4$ раза, в щелочной – в $6 \dots 7$ раз.

12. Эксплуатационные испытания свидетельствуют о высокой надёжности восстановленных распылителей форсунок карбидохромовыми покрытиями. Испытания продолжаются.

ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КАРБИДОХРОМОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Структура технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома

Распылители форсунок дизелей как механической топливной системы, так и Common Rail имеют одинаковую форму, но отличаются размерами. Это позволяет коррелировать разработанную нами технологию на большое количество номенклатур серийно выпускаемых изделий. Последовательность действий при организации работ по восстановлению деталей прецизионных пар с применением CVD-покрытий представлена на рисунке 5.1.

Разработанная технология может быть рекомендована сельскохозяйственным предприятиям и сервисным станциям, занимающимся ремонтом и техническим обслуживанием ТА дизельных двигателей. В ремонтную организацию ремфонд распылителей форсунок может поступать разными путями, например, при плановом проведении ТО автотракторного дизеля, передаче накопленных деталей сторонними предприятиями и дилерами или другими способами [28, 76, 107, 132]. При поступлении в ремонт узлы разбираются, моются в ультразвуковой ванне типа ПСБ-8060-05 с применением рабочей жидкости типа *Галс* при температуре 50...60°С. Загрузку и выгрузку деталей, подлежащих очистке, следует производить при выключенной моечной машине. Продолжительность очистки зависит от производительности установки и степени загрязнённости деталей и может варьироваться в пределах 5...15 минут [108, 121, 122, 123, 131, 185]. После детали достаются из моющего раствора, вытираются чистыми

хлопчатобумажными салфетками, укладываются в переносную тару и отправляются на дефектовку.

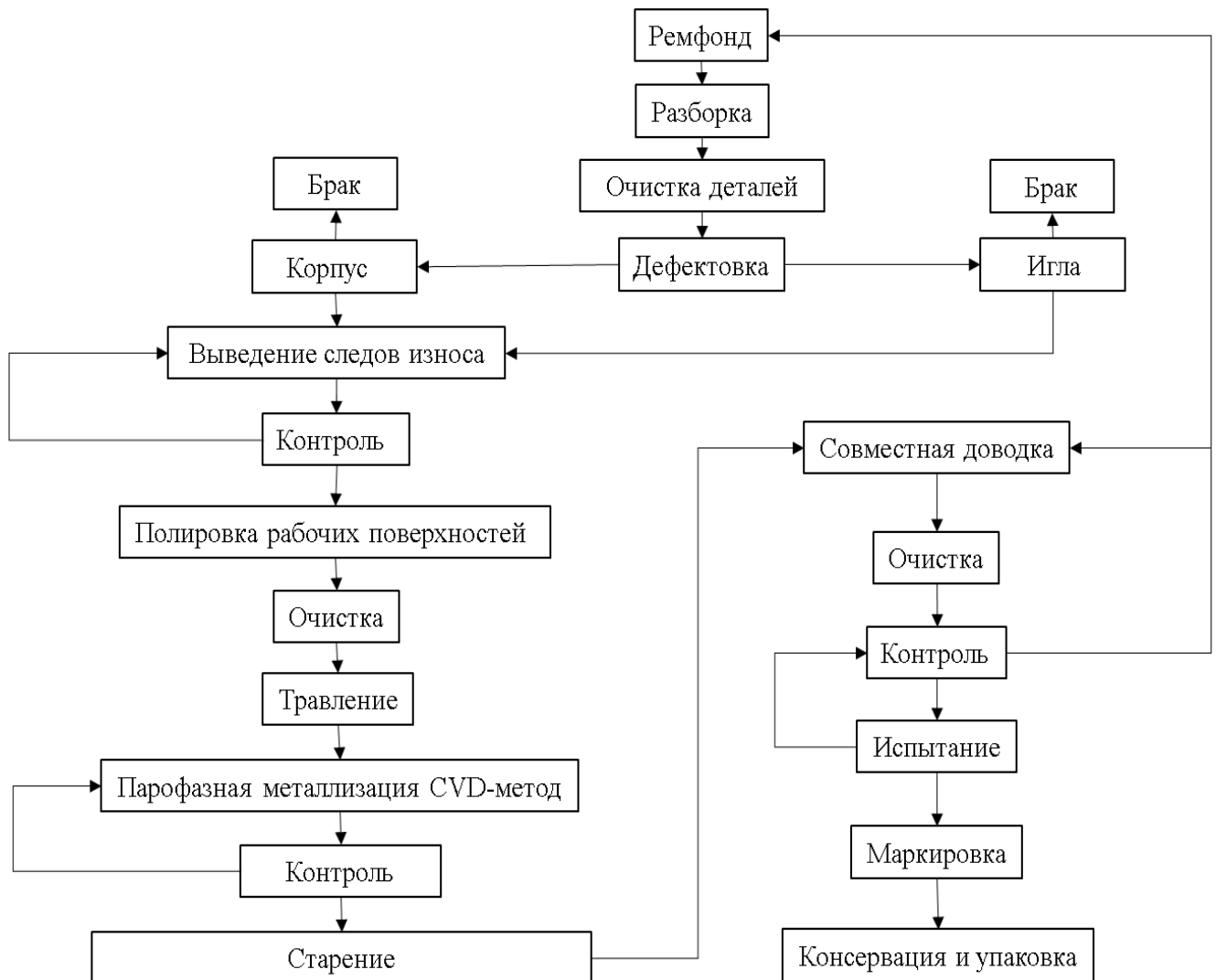


Рисунок 5.1 – Структурная схема технологического процесса.

Основные дефекты распылителей форсунок представлены в главе 1, и, как отмечалось ранее, к восстановлению данным способом пригодны до 90% объёма ремфонда. В процессе дефектации иглы и корпуса распылителей сортируются, выбраковываются и измеряются, а также делятся по типоразмерным группам и износу, последнее обеспечивает целесообразность использования реактива. Проверка линейных размеров, восстанавливаемых изношенных поверхностей распылителей форсунок, осуществляется путём трёхкратного промера с помощью рычажной скобы типа СР 0-25-0,002 ГОСТ 11098 [46] с ценой деления 0,002мм или

оптикаторов типа 01П ГОСТ 28798 [60]. Измерение направляющей в корпусе распылителя проводится индикаторным нутромером с ценой деления 0,001 мм в двух сечениях.

В зависимости от модели восстанавливаемых распылителей производится типовой расчёт на определение оптимальной толщины покрытия по методике 2.3 настоящей работы. Далее детали подвергаются механической обработке, с помощью которой выводятся следы износа. Направляющая поверхность корпуса распылителя хонингуется, а иглы точится или шлифуется. Распыляющие отверстия рассверливаются, запорные конуса корпуса и иглы шлифуются. Торцы корпуса и иглы доводятся на притирочной плите.

Предельный припуск на механическую обработку устанавливается при разработке технологического процесса восстановления. После механической обработки детали подвергаются техническому контролю, а при необходимости сортируются по размерным группам. Для обеспечения экономической целесообразности использования реактива требуется полирование поверхностей, подвергнутых механической обработке, до шероховатости Ra0,2 мкм. Далее детали подвергают повторной очистке в ультразвуковой ванне для удаления остатков частиц металла и других загрязнений, идущих после предшествующих операций, в течение 5...10 минут. На данном этапе моющая жидкость в ультразвуковой ванне должна подлежать замене при достижении загрязнённости раствора 9...10 класса чистоты по ГОСТ 17216 [53, 123, 131]. При массовом восстановлении распылителей в целях повышения экономической эффективности технологического процесса путём снижения трудоёмкости и временных затрат оптимально использовать дополнительную ультразвуковую ванну типа ПСБ-4035-05, а отработанную моющую жидкость возможно повторно использовать на первой мойке деталей, которая необходима для проведения дефектовки.

Перед металлизацией выполняется химическое травление деталей в 10% растворе серной кислоты при температуре 70 °С и продолжительности 50...80 с. Далее осуществляется промывка в горячей, при температуре 60–70 °С, и холодной

воде [102, 131]. После этого детали протираются хлопчатобумажными салфетками. Далее иглы распылителей устанавливаются на навеску, а корпуса в индуктор и выставляются в реакторы CVD-установок [148, 230] для дальнейшего осаждения на них карбидохромового покрытия на режиме: давление вакуума 0,025 Па, подача реакционной среды 1,0 л/час, температуры подложки 161°С и паров гексакарбонила хрома 60 °С. Алгоритм работы CVD-установок при формировании покрытия представлен в параграфе 3.3.

В начале формирования упрочняющего покрытия для увеличения адгезии детали нагреваются до заданной температуры технологического процесса и подвергаются дегазации путём нахождения их в вакууме до выравнивания давления, задаваемого технологическим режимом, в системе CVD-установки. Продолжительность данного процесса 8...12 минут. Далее осуществляется подача реакционной среды в зону ведения металлизации. В начале этого процесса в течение двух минут необходимо выдержать скорость подачи гексакарбонила хрома до 0,1 л/час для создания адгезионного подслоя, главными задачами которого являются равномерное заполнение всего объёма микрорельефа поверхности подложки и снижение вероятности образования пустот на границе перехода между покрытием и металлом. После этого, в целях снижения себестоимости применяемой технологии, равномерно увеличивается подача реакционной среды до заданного режима. Продолжительность восстановления геометрических размеров деталей распылителя 261.1112110-01 форсунки 261.1112010-11 при толщине покрытия 45,625 мкм на радиус направляющей и 139,45 мкм на радиус распыляющих отверстий составляет 23 минуты с учётом формирования адгезионного подслоя. По завершению формирования покрытия и остыванию деталей они подлежат контролю на соответствие качества.

Проверка микротвёрдости покрытия осуществляется твердомером DuraScan 20 G5 путём вдавливания алмазной пирамиды с углом при вершине 136° под действием нагрузки 0,2Н в течение 15 с. Прошедшие проверку, детали отправляются на следующую технологическую операцию – старение, а не прошедшие либо повторно подлежат упрочнению, либо бракуются и обратно

поступают в ремфонд или утилизируются. Старение ведётся в муфельной термопечи при температурном режиме 120 °С и выдержке в течение двух часов. После охлаждения подлежат контролю на наличие дефектов.

Далее детали направляются на селективную сборку. Распыляющие отверстия в целях доводки и выравнивания геометрии подлежат электроэрозионной обработке до диаметра, регламентируемого изготовителем. Запорные конусы иглы и корпуса шлифуются до удаления технологических слоёв карбида хрома. Совместная доводка иглы и корпуса распылителя в направляющей и запорном конусе проводится притирочной пастой, содержащей частицы эльбора (кубического нитрида бора) типа ЛКВ40 5/3 или синтетических алмазов типа: А АС4 5/3, 100/80. После детали подлежат ультразвуковой очистке в ванне типа ПСБ-4035-05, визуальному контролю на наличие сколов и дефектов, сборке, проверке параметров распылителя в соответствии с ТУ и ГОСТ 10579, сопровождающейся испытаниями на работоспособность.

Проверка работоспособности восстановленного распылителя осуществляется путём установки его в форсунку с последующим подключением её к испытательному стенду типа СТ.441439.107, Bosch EPS 708, Dieselland CR-JET4-M, Maktest ТК 1022 и других, или на испытательных стендах для диагностики форсунок типа Bosch EPS 200, Hartridge IFT-70, Башдизель ВТС 203 и КИ-5918, предназначенных для проверки выходных параметров форсунки [13, 38, 122, 197]. Оценка работоспособности распылителя проверяется на соответствие качества распыливания топлива, давления начала впрыскивания, гидроплотности и герметичности запирающих конусов. Эффективность проходного сечения распыляющих отверстий проверяются проливом, а полученные данные сверяются с регламентными. Распылители, которые не удовлетворяют требованиям [44, 66, 109, 235], направляются в ремфонд на повторное восстановление или бракуются.

Распылители, прошедшие проверку, маркируются, консервируются в соответствии с ГОСТ 9.014 [67], упаковываются и направляются на склад. В случае проведения ремонтных работ устанавливаются на двигатель в соответствии с указаниями, прописанными в руководстве по эксплуатации и рекомендованными

изготовителем. Хранение восстановленных распылителей осуществляется по ГОСТ 15150 [50] с использованием закрытой тары, предохраняющей от попадания загрязнений, механических повреждений и прямого контакта с атмосферой окружающей среды.

Восстановленные и упрочнённые распылители форсунок автотракторных дизелей пригодны для ремонта. Наиболее слабое место – запорный конус, который подвержен кавитационному и гидроабразивному изнашиванию, а по достижению предельного значения износа нарушается его герметичность. Однако интенсивность износа запорного конуса при упрочнении направляющей и распыляющих отверстий в сравнении с серийными деталями снижается. В целях восстановления работоспособности запорный конус может быть восстановлен путём совместной доводки притирочной пастой до полного выведения следов износа. При износе упрочняющего покрытия на направляющей и в распыляющих отверстиях деталей распылителя возможно повторное осаждение на них карбидов хрома.

При восстановлении распылителей форсунок допускается следующее: на корпусе освежать направляющую поверхность карбидом хрома до толщины покрытия свыше критической 5 мкм с условием полного восстановления геометрических размеров распыляющих отверстий, а основное осаждение вести на направляющей иглы и наоборот.

Участок для восстановления распылителей форсунок должен располагаться в изолированном, хорошо освещённом и отапливаемом помещении, которое должно иметь приточно-вытяжную вентиляцию и заземляющий контур. Рабочие места для мойки дизельной аппаратуры, её регулировки и испытаний должны быть оборудованы местными вытяжными зонтами. Температура в помещении должна быть не ниже 18 °С. Пол и стены должны быть облицованы материалами, которые не впитывают дизельное топливо и его пары. Сопротивление изоляции электросетей должно быть не менее 1,0 МОм [132].

5.2. Экономическая эффективность восстановления распылителей

Экономический эффект от внедрения разработанной технологии характеризуется двухсторонним влиянием. С одной стороны, восстановление распылителей форсунок должно быть рентабельно для сервисных организаций, а с другой, использование в топливной аппаратуре дизельных двигателей упрочнённых распылителей выгодно предприятиям, занимающимся их эксплуатацией. На основании этого требуется определить стоимость восстановления распылителя форсунки и дать оценку стоимости владения дизельной техники с учётом её эксплуатации на серийных и упрочнённых распылителях [122, 132].

Стоимость восстановления распылителей форсунок зависит от объёма ремфонда, его стоимости, производительности и загрузки оборудования, стоимости и расхода материала и реактива, трудоёмкости технологического процесса, квалификации персонала, затрат на организацию и управление производством. Рассмотрим пример восстановления и упрочнения распылителей форсунок в крупной сервисной организации с продолжительностью рабочей смены 12 часов в течение 364 дней. Номинальный фонд рабочего времени составит 4 368 часов. При данном режиме работы, с суточной программой восстановления 500 распылителей, годовой объём составит 177 000 единиц с учётом ежегодного поддержания КТГ оборудования на уровне 0,97 или с суммарной годовой продолжительностью ремонта оборудования 10 календарных дней.

Условия финансовой реализуемости и показателей эффективности определяются на основании денежного потока. Финансовые показатели и условия реализуемости технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома оцениваются в текущих и прогнозируемых ценах, а остальные показатели определяются в текущих или дефлированных ценах.

Экономический эффект от внедрения технологии рассчитывается по формуле [102, 126, 155, 228, 232]:

$$\mathcal{E}_T = P_T - Z_T \quad (5.1)$$

где P_T – стоимостная оценка результатов, полученных в результате внедрения технологии за расчётный период, рублей; Z_T – стоимостная оценка затрат предприятия на внедрение технологии за расчётный период, рублей.

Стоимостная оценка результатов за расчётный период определяется из выражения:

$$P_T = (1 - C_{\%}) \cdot \sum_{t=t_n}^{t_k} N \cdot C_{Ti} \cdot \alpha_{t_i} \cdot k_{Иi} \quad (5.2)$$

где $C_{\%}$ – ставка налога на прибыль, % (для организаций, применяющих общую систему налогообложения – 20%); N – объём восстановленных и упрочнённых распылителей форсунок за расчётный период внедрения технологии, шт.; C_{Ti} – цена реализации единицы продукции, рублей; α_{t_i} – коэффициент дисконтирования денежных потоков в рассматриваемый период времени; $k_{Иi}$ – коэффициент, учитывающий инфляцию по годам расчётного периода; t_n – расчётный период, год; t_k – конечный период, год.

Стоимостная оценка затрат на внедрение технологии химической парофазной металлизации за расчётный период определяется из выражения:

$$Z_T = \sum_{t=t_n}^{t_k} (N \cdot C_{Ti} + k_{Ti} - Л_{Ti}) \cdot \alpha_{t_i} \cdot k_{Иi} \quad (5.3)$$

где C_{Ti} – себестоимость восстановления распылителя, рублей; k_{Ti} – капитальные вложения на организацию восстановления распылителей, рублей; $Л_{Ti}$ – ликвидационное сальдо основных фондов, выбывающих в году t после внедрения технологии, рублей.

Коэффициент дисконтирования определяет разновременность денежного потока:

$$\alpha_{t_i} = \frac{1}{(1 + E_H)^{tp - t^0}} \quad (5.4)$$

где E_n – норма дисконта, коэффициент приведения разновременных затрат и результатов, численно равный нормативу эффективности капитальных вложений, $E_n = 0,1$; t_p – момент окончания расчётного периода, год; t^0 – момент начала расчётного периода, год.

Сальдо денежного потока или чистый доход, накопленный за рассматриваемый период, рассчитывается по формуле:

$$\text{ЧД} = \sum_{t=0}^t \varphi_{ti} \quad (5.5)$$

где φ_{ti} – денежный поток за период, рублей.

Чистый дисконтированный доход, накопленный за расчётный период, определяется формулой:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^t \varphi_{ti} \cdot \alpha_{t_i} \quad (5.6)$$

Для оценки эффективности разработанной технологии внутренняя норма доходности (ВНД) должна быть не ниже нормы дисконта $\text{ВНД} \geq E$, что позволит определить рентабельность проекта, которая определяется формулой:

$$\text{ВНД} = \sum_{t=0}^t \frac{\text{ЧД}}{(1 + E_n)^{t_p - t^0}} \quad (5.7)$$

Срок окупаемости капитальных вложений для внедрения технологии восстановления и упрочнения определяется выражением:

$$t_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{п}}}{\Delta_{\text{т}}} \quad (5.8)$$

где $K_{\text{п}}$ – объём инвестиций, рублей.

Устойчивость проекта по отношению к возможным изменениям реализации характеризуется показателем границ безубыточности, который рассчитывается по формуле:

$$УБ_n = \frac{C_n - CV_n - DC_n}{S_n - CV_n} \quad (5.9)$$

где C_n – полные издержки производства за рассматриваемый период, рублей; CV_n – условно-переменная часть полных издержек производства, включающая амортизацию, налоги и иные отчисления, пропорциональные выручке за рассматриваемый период, рублей; DC_n – доходы от внереализованной деятельности за вычетом расходов по этой деятельности за рассматриваемый период, рублей; S_n – объём выручки, рублей.

Проект считается устойчивым, если при его реализации уровень безубыточности не превышает 60...70% после освоения проектных мощностей. Уровень безубыточности при значениях ближе к 100% свидетельствует о недостаточной устойчивости проекта, вызванной колебаниями спроса на продукцию на рассматриваемом периоде времени реализации.

Себестоимость восстановленного распылителя форсунки определяется по формуле:

$$C_{Ti} = 3A_{\Pi}^{\text{общ}} + 3A_o^{\text{общ}} + 3O_o^{\text{общ}} + PM^{\text{общ}} + 3P_o^{\text{общ}} + 3P_d^{\text{общ}} + N_{\text{ФОТ}}^{\text{общ}} + R\Phi^{\text{общ}} + 3Э^{\text{общ}} + 3C_x^{\text{общ}} + Пр^{\text{общ}} + ОПУ \quad (5.10)$$

где $3A_{\Pi}^{\text{общ}}$ – затраты на амортизацию (аренду) производственных помещений, рублей; $3A_o^{\text{общ}}$ – затраты на амортизацию оборудования и инструмента, рублей; $3O_o^{\text{общ}}$ – затраты на обслуживание оборудования (в период амортизации оборудования 20% от стоимости нового в год), рублей; $PM^{\text{общ}}$ – затраты на расходные материалы, рублей; $3P_o^{\text{общ}}$ – основная заработная плата работников, занятых восстановлением распылителей, рублей; $3P_d^{\text{общ}}$ – дополнительная заработная плата работников, рублей; $N_{\text{ФОТ}}^{\text{общ}}$ – налоговый платёж из фонда заработной платы, рублей; $R\Phi^{\text{общ}}$ – затраты на приобретение ремонтного фонда, рублей; $3Э^{\text{общ}}$ – затраты на электроэнергию, рублей; $3C_x^{\text{общ}}$ – затраты на организацию хранения восстановленных распылителей форсунок, рублей; $Пр^{\text{общ}}$ – прочие затраты или услуги сторонних организаций (2% ФОТ), рублей;

ОПУ – затраты на управление и организацию технологии восстановления распылителей форсунок (2...3% ФОТ), рублей.

Затраты на амортизацию помещения (аренда), входящие в себестоимость восстановленного и упрочнённого распылителя, определяются уравнением:

$$ЗА_{\Pi}^{\text{общ}} = \sum_{n=1}^n \frac{1}{N} \cdot (C_{\text{ап}} + C_{\text{ком}}) \quad (5.11)$$

где $C_{\text{ап}}$ – затраты на аренду помещения, рублей; $C_{\text{ком}}$ – затраты на коммунальные услуги (вывоз мусора, водоснабжение, канализация, отопление), рублей.

Амортизация оборудования определяется выражением:

$$ЗА_{\text{о}}^{\text{общ}} = \sum_{n=1}^n \frac{1}{N} \frac{C_{\text{н}}}{t} \quad (5.12)$$

где $C_{\text{н}}$ – стоимость нового оборудования с учётом доставки и утилизационного сбора, рублей; t – планируемый период амортизации, лет.

Затраты на расходные материалы, применяемые для восстановления и упрочнения распылителей, определяются по формуле:

$$PM^{\text{общ}} = \sum_{n=1}^n N \cdot (C_{\text{м}} \cdot V_{\text{м}} \cdot k_{\text{р}} + C_{\text{у}}) \quad (5.13)$$

где $C_{\text{м}}$ – стоимость материалов, применяемых в технологическом процессе восстановления и упрочнения распылителей, рублей; $V_{\text{м}}$ – объём затрачиваемых материалов, ед. изм., (шт., кг, л); $k_{\text{р}}$ – норма расхода материалов на восстановление одного распылителя форсунки, (шт., кг, л)/шт.; $C_{\text{у}}$ – затраты на утилизацию расходных материалов, рублей.

Заработная плата определяется выражением:

$$ЗП_{\text{о}}^{\text{общ}} = \sum_{t=1}^n T_i \cdot C_{\text{час}} \quad (5.14)$$

где T_i – трудоёмкость выполнения работ по восстановлению распылителя форсунки, чел.-час; $C_{\text{час}}$ – средняя часовая тарифная ставка работников, рублей в час.

Дополнительная заработная плата работников находится в пределах 5...15 % от основной заработной платы.

Явочный состав работников определяется по формуле:

$$P_{\text{яв}} = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{об}}}{\Phi_{\text{дв}}} \quad (5.15)$$

где $P_{\text{яв}}$ – списочное число работников, человек; $T_{\text{пл}}$ – общая трудоёмкость работ по восстановлению распылителей форсунок, чел.-ч.; $T_{\text{об}}$ – продолжительность работы оборудования (ультразвуковая ванна, притирочный станок, CVD-установки, термопечь), ч; $\Phi_{\text{дв}}$ – действительный фонд времени работников без потери рабочего времени, ч.

Количество вспомогательных работников принимается в размере 10% от общей численности работников основного состава:

$$P_{\text{в}} = 0,1P_{\text{яв}} \quad (5.16)$$

Налоги, выплачиваемые ремонтным предприятием из фонда оплаты труда:

$$N_{\text{ФОТ}}^{\text{общ}} = \text{ПФ} + \text{ФСС} + \text{ОМС} + \text{СКОУ} + \text{МОС} + \text{ФЗ} \quad (5.17)$$

где ПФ – отчисления в пенсионный фонд, ПФ = 20,6% ФОТ; ФСС – отчисления в фонд социального страхования, ФСС = 5,4% ФОТ; ОМС – отчисления в фонд обязательного медицинского страхования, ОМС = 3,6% ФОТ; СКОУ – сбор на нужды образовательных учреждений, СКОУ = 1 ... 3% ФОТ; МОС – местные отчисления и сборы, МОС = 1...3% ФОТ; ФЗ - отчисления в фонд занятости, ФЗ = 2% ФОТ.

Стоимость изношенных деталей, получаемых от поставщиков ремонтного фонда (предприятий, обменных пунктов, торговых баз), обычно устанавливается

равной 10% от цены новой детали или по цене металлолома с наценкой до 20%, тогда затраты на приобретение ремонтного фонда, будут выражаться следующей формулой:

$$P\Phi^{общ} = 0,1C_{дн} = (1 + c)Ц_m \cdot M_{ди} \quad (5.18)$$

где $C_{дн}$ – стоимость нового распылителя, рублей; c – наценка, %; $Ц_m$ – стоимость металлолома, рублей/кг; $M_{ди}$ – масса распылителя, кг.

Общий расход электрической энергии определяется как:

$$ЗЭ^{общ} = ЗЭ_{сил} + ЗЭ_{осв} \quad (5.19)$$

где $ЗЭ_{сил}$ – расход силовой энергии при условии $ЗЭ_{сил} = ЗЭ_{об}$, кВт·ч; $ЗЭ_{об}$ – расход электроэнергии для привода оборудования, кВт·ч; $ЗЭ_{осв}$ – расход электроэнергии на освещение и вентиляцию, кВт·ч.

Расход электроэнергии для привода оборудования:

$$ЗЭ_{об} = P_{уст} \cdot \Phi_{до} \cdot \eta_z \cdot K_{сп} \quad (5.20)$$

где $P_{уст}$ – установленная мощность потребителей на участке по группам оборудования, кВт; $\Phi_{до}$ – действительный фонд времени оборудования при $\Phi_{до} = D \cdot T$, час; D – количество рабочих дней в году; T – количество часов работы оборудования, час; η_z – коэффициент загрузки (0,60...0,75); $K_{сп}$ – коэффициент спроса, учитывающий одновременность работы потребителей 0,75.

Затраты на организацию хранения восстановленных распылителей форсунок выражается формулой:

$$ЗC_x^{общ} = ЗП_о + Н_о + C_{стрх} + C_{уп} + C_{пр} \quad (5.21)$$

где $ЗП_о$ – заработная плата ответственного за склад, рублей; $Н_о$ – налоговые отчисления за работника, ответственного по складу, рублей; $C_{стрх}$ – затраты на страхование продукции, рублей; $C_{уп}$ – затраты на упаковку, рублей; $C_{пр}$ – прочие затраты (логистика, канцелярия, оргтехника, профилактический ремонт помещения и другое).

5.2.1. Расчёт экономической эффективности от внедрения технологии восстановления распылителей форсунок

Приведённый расчёт экономической эффективности восстановления и упрочнения распылителей форсунок в условиях экономической нестабильности и рыночной конкуренции позволяет получить и оценить индикативную себестоимость восстановления распылителя в моменте, т.е. затраты актуальны и действительны в течение короткого периода времени. Кроме того, себестоимость восстановления может существенно отличаться в зависимости от региона, удалённости от потребителей, рыночной стоимости капитальных затрат и другого.

Средняя стоимость аренды производственного помещения в месяц в Московской области на начало первого полугодия 2023 года составила 320 рублей/м². Среднее ежегодное изменение стоимости аренды, согласно статистическим данным, взятых из средств массовой информации за последние 5 лет, составляет +8,79%. При организации производственного участка, размещаемого на площади 250 м², из которой 36 м² занимает склад, со сроком начала аренды с 2024 года и заключении договора на фиксированную стоимость с учётом изменения ежегодной стоимости на величину инфляции, среднемесячная стоимость в первый год составит в среднем 363,43 рубля/м². Общие затраты на 2024 год составят 1 690,28 тыс. рублей, включая годовые затраты на коммунальные услуги в объёме 600 тыс. рублей. Расчёт арендной платы на последующие годы также предусматривает увеличение стоимости коммунальных платежей по отношению к предшествующему году на уровень годовой инфляции.

Для выполнения технологического процесса рекомендуется использовать оборудование и инструмент или наиболее ближайшие их аналоги, которые представлены таблице 5.1 [121, 122, 123]. Объём инвестиций для реализации проекта 49 532,29 тыс. рублей с учётом капиталовложений на закупку оборудования 23 008,8 тыс. рублей. Амортизация оборудования в расчёте принята в течение 10 лет.

Номенклатура расходных материалов представлена в таблице 5.2 с учётом нормы расхода на один распылитель.

Таблица 5.1 – Номенклатура оборудования для восстановления распылителей.

Наименование	Модель	Кол-во, шт.	Стоимость, шт. рублей	Операция
Ультразвуковая ванна в сборе	ПСБ-8060-05	1	98 000,00	Моечная
Ультразвуковая ванна в сборе	ПСБ-4035-05	1	40 000,00	Моечная
Скоба рычажная	CP 0-25-0,002	2	38 500,00	Дефектовочная/ контрольная
Нутромер индикаторный	50-100 0,001	2	61 900,00	Дефектовочная/ контрольная
Токарно-фрезерный станок ЧПУ	SKM NL1500M	1	7 050 000,00	Шлифование/ фрезерование/ точение/ полирование
Электроэрозионный станок	PROTECH DK-7720	1	1 290 000,00	Электроэрозионная
Притирочный станок	KD15B(X)	1	1 750 000,00	Доводочная
Ванна цеховая с подогревом и корзиной	HESSEN BM3/4	3	20 000,00	Подготовительная
CVD-установка (иглы)	RU 2456373	1	3 500 000,00	Металлизационная
CVD-установка (корпус)	RU 216021 U1	1	3 500 000,00	Металлизационная
Микротвердомер	DuraScan 20 G5	1	5 420 000,00	Контрольная
Муфельная электропечь	ЭКПС-50	1	350 000,00	Старение
Топливный стенд	СТ.441439.107	1	750 000,00	Испытания
Прочее (стеллажи, верстаки, инструмент и т.д.)			1 000,00	Оргтехпроцесс

Таблица 5.2 – Номенклатура расходных материалов.

№ п.п.	Наименование	Марка	Объём	Стоимость, рублей	Расход на шт.	Расход на сутки
1	Моющее средство	Галс-Универсал	10 л	7 500,00	0,005	2,5
2	Хлопчатобумажные салфетки	ТКАНИТЕХ	1000 шт.	17 500,00	0,2	100
3	Серная кислота 10%	ЛЕНРЕАКТИВ	20 кг	4 800,00	0,01	5
4	Гексакарбонил хрома	CAS 13007-92-6	1 кг	9 600,00	0,002	1
5	Притирочная паста	ЛКВ40 5/3	0,1 кг	1 500,00	0,0005	0,25
6	Дизельное топливо	ДТ Л-0,2-40	5 л	250,00	0,01	5

Общая трудоёмкость восстановления и упрочнения распылителей форсунок автотракторных дизелей по предлагаемой технологии складывается из трудоёмкости каждой из операций и определяется путём хронометража. В таблице 5.3 приведён последовательный хронометраж восстановления распылителей в объёме 1, 100 и 500 штук в сутки с трудоёмкостью восстановления.

Таблица 5.3 – Хронометраж и трудоёмкость восстановления распылителей.

Наименование операции	Количество распылителей, шт.		
	1	100	500
	Продолжительность		
	мин	час	час
Разборка распылителя	0,08	0,13	0,67
Мойка №1	10,00	0,17	0,85
Сушка	0,14	0,23	1,17
Дефектовка	0,50	0,83	4,17
Механическая обработка и контроль №1	1,24	2,07	10,33
Притирочная	15,00	0,25	1,25
Мойка №2	7,50	0,13	0,65
Сушка	0,14	0,23	1,17
Травление	3,00	0,05	0,25
Сушка	0,14	0,23	1,17
Монтаж деталей в CVD установки	0,12	0,20	1,00
Создание вакуума	8,00	0,12	0,6
Дегазация	10,00	0,17	0,83
Формирование адгезионного подслоя	2,00	0,03	0,17
Рост покрытия до требуемой толщины	21,00	0,35	1,75
Охлаждение	12,50	0,21	1,04
Контроль №2	1,00	1,60	8,00
Старение	140,00	2,33	11,65
Охлаждение	12,50	0,20	1,00
Электроэрозионная обработка	1,10	1,83	9,15
Шлифование запорных конусов	0,67	1,11	5,55
Селективная сборка/ доводка	1,40	2,33	11,67
Мойка №3	10,00	0,17	0,85
Контроль №3	0,30	0,50	2,50
Испытания	4,80	2,00	10,00
Консервация	0,40	0,67	3,33
Упаковка	0,50	0,83	4,17

Наименование операции	Количество распылителей, шт.		
	1	100	500
	Продолжительность		
	мин	час	час
Продолжительность техпроцесса, час	4,40	18,97	94,94
Продолжительность работы оборудования, час	3,93	3,93	19,64
Трудоёмкость технологических операций, чел/час	0,47	15,04	75,3
Количество работников на смене, чел	0,06	1,37	6,13
Явочный состав работников, чел	1	2	7
Количество вспомогательных работников, чел	0	0	1

Таким образом, для восстановления распылителей форсунок с годовой производительностью 177 000 штук необходимо иметь 7 явочных и одного вспомогательного работника для обеспечения планового восстановления распылителей. Однако для соблюдения условий в обеспечение безопасности труда, согласно ТК РФ, с учётом продолжительности рабочей смены и трудовой недели для обеспечения выполнения производственной программы необходимо наличие двух бригад с общим числом работников 16 человек, из которых 2 вспомогательных. Распределение занятости работников при выполнении технологического процесса восстановления и упрочнения распылителей форсунок представлено в таблице 5.4. Для обеспечения, соблюдения рекомендаций в выполнении технологического процесса и контроля за выпускаемой продукцией необходимо учесть занятость двух инженеров-технологов.

Таблица 5.4 – Распределение занятости работников при восстановлении распылителей.

Наименование работ	Количество, чел
Мойка, дефектовка, сушка, травление	1
Механическая обработка, полирование, притирка, контроль №1	1
Термическая обработка, контроль №2 и за эксплуатацией оборудования	1
Электроэрозионная обработка, шлифование запорных конусов	1
Селективная сборка	1
Контроль №3, испытания распылителей	1
Консервация, упаковка, шлифование запорных конусов	1
Вспомогательный работник	1
Всего человек:	8

Заработная плата работников определяется часовой ставкой и должна быть не ниже регионального уровня. В условиях Московской области в расчёте принята ставка равной 450 рублей в час, для сотрудников ИТР 650 рублей в час. Дополнительные выплаты составляют 15% от основной зарплаты. Налоговые и социальные отчисления на одного работника в расчёте принято 35,6%. В целях снижения ротации кадров в годовых затратах заработной платы учитывается её увеличение на величину инфляции.

Затраты на ремфонд считались при условии покупки изношенного распылителя по цене металлолома 25 рублей/кг с 20% наценкой. Для обеспечения гарантированного объёма ремфонда минимальное количество распылителей должно закупаться не менее 197 тыс. штук в год. В целях снижения рисков простоя оборудования и увеличения затрат на закупку ремфонда в расчёте учитывается увеличение стоимости металлолома на величину инфляции.

Затраты на электроэнергию в первый год с учётом её средней стоимости 7,2 рублей/кВт и суточным расходом 650 кВт составят 1 420 тыс. рублей.

Годовые затраты на организацию хранения и отгрузки клиентам (заказчикам) упрочнённых распылителей учитывают наличие специалиста, ответственного за содержание склада, приём изношенных и отгрузку восстановленных распылителей. Часовая ставка данного специалиста принята из расчёта 525 рублей при режиме работы 40 часов в неделю и среднемесячной выработке 174 часа. Кроме этого, годовые затраты учитывают страховку продукции 50 тыс. рублей, стоимость упаковки 12 рублей на один распылитель и накладных расходов 500 тыс. рублей. Следовательно, затраты на организацию хранения и отгрузки восстановленных распылителей в первый год составят 4 029,41 тыс. рублей. В таблице 5.5. представлена калькуляция годовых затрат на реализацию технологии восстановления и упрочнения деталей распылителей форсунок. Математическая модель предусматривает плавный запуск начала восстановления распылителей с выходом на требуемую ежемесячную производительность в течение двух месяцев.

Таблица 5.5 – Экономические показатели от внедрения технологии восстановления и упрочнения распылителей форсунок карбидохромовым покрытием.

Показатели	Ед. изм.	Годы				
		2024	2025	2026	2027	2028
Программа восстановления/ объём реализации	тыс. шт.	147,5	177	177	177	177
Цена серийного распылителя	руб./шт.	390	425	460	500	545
Цена восстановленного и упрочнённого распылителя	руб./шт.	800				
Выручка в год	тыс. руб.	118 000	141 600	141 600	141 600	141 600
Себестоимость восстановления распылителя	руб./шт.	336	318	340	361	375
Себестоимость восстановления распылителей	тыс. руб.	49 532	56 209	60 229	63 894	66 439
<i>Затраты на аренду помещения</i>	тыс. руб.	1 690	1 837	1 976	2 102	2 189
<i>Амортизация оборудования</i>	тыс. руб.	2 342	2 810	2 810	2 810	2 810
<i>Затраты на обслуживание оборудования</i>	тыс. руб.	3 835	5 002	5 378	5 722	5 960
<i>Затраты на расходные материалы</i>	тыс. руб.	5 328	5 883	6 325	6 729	7 010
<i>Фонд оплаты труда и страхования</i>	тыс. руб.	28 949	31 466	33 834	35 994	37 494
<i>Затраты на приобретение ремфонда</i>	тыс. руб.	492	642	690	734	765
<i>Затраты на электроэнергию</i>	тыс. руб.	1 420	1 426	1 534	1 631	1 699
<i>Затраты на организацию хранения</i>	тыс. руб.	4 029	5 256	5 651	6 012	6 263
<i>Услуги сторонних организаций (прочие затраты)</i>	тыс. руб.	579	755	812	864	900
<i>Затраты на управление и организацию</i>	тыс. руб.	868	1 132	1 217	1 295	1 349
Капитальные вложения	тыс. руб.	23 009	-	-	-	-
Ликвидационное сальдо	тыс. руб.	2 342	5 152	7 963	10 773	13 584
Коэффициент дисконтирования (приведения)		1,00	0,91	0,83	0,75	0,68
Коэффициент, учитывающий инфляцию		0,9	0,92	0,93	0,94	0,96
Стоимостная оценка затрат	тыс. руб.	63 179	62 008	58 104	53 671	49 524
Стоимостная оценка результатов	тыс. руб.	84 960	94 838	87 441	79 862	73 949
Экономический эффект	тыс. руб.	21 781	32 830	29 336	26 191	24 425
Граница безубыточности		0,42	0,40	0,43	0,45	0,47
Срок окупаемости	лет	2,3				

На основании данных, изложенных в таблице 5.5 построен график (рисунок 5.2), определяющий точку и границы безубыточности [126]. Установлено, что восстанавливать и реализовывать распылители форсунок с годовой программой менее 59 тыс. шт. в год или 162 распылителя в сутки при использовании выбранного оборудования экономически нецелесообразно.

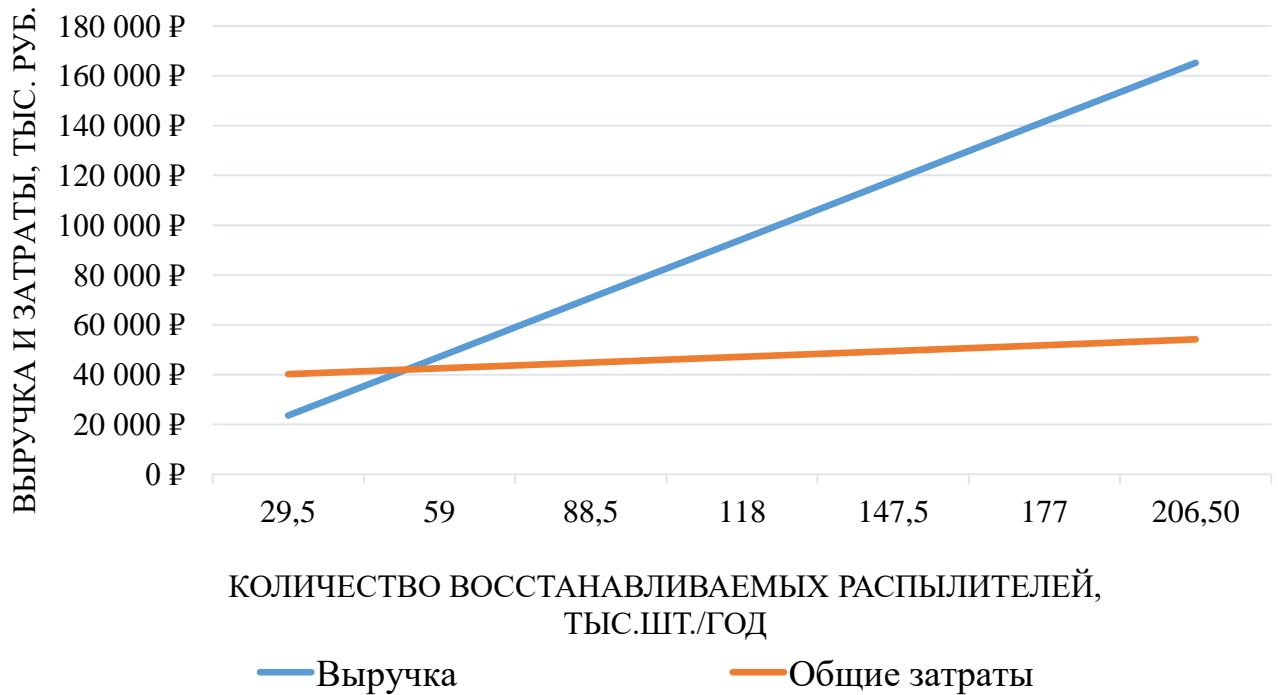


Рисунок 5.2 – График точки безубыточности.

Расчёт денежных потоков и показателей эффективности реализации технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома представлен в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Показатели эффективности разработанной технологии.

Показатель	Шаг расчёта, год					
	0	1	2	3	4	5
Денежный поток от операционной деятельности, тыс. руб.	-	21 781	32 830	29 336	26 191	24 425
Инвестиционная деятельность, тыс. руб.	-49 532	-	-	-	-	-
Сальдо суммарного потока, тыс. руб.	-49 532	21 781	32 830	29 336	26 191	24 425
Сальдо накопленного потока, тыс. руб.	-49 532	-27 752	5 079	34 415	60 606	85 031
Коэффициент дисконтирования	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62

Накопленное дисконтированное сальдо суммарного денежного потока, тыс. руб.	-49 532	-29 732	-2 599	19 442	37 331	52 497
ЧД	85 031					
ЧДД	52 497					
ВНД	45,57%					
Дисконтированный срок окупаемости	2,1 года					

Таким образом, внедрение технологии восстановления и упрочнения распылителей форсунок карбидохромовыми покрытиями за расчётный период в течение 5 лет даст 85 031 тыс. рублей чистого дохода при дисконтируемом сроке окупаемости инвестиций в 2,1 года. Рентабельность технологии, как инвестиционного проекта, 45,57%. Разработанная технология может быть рекомендована заводам изготовителям топливной аппаратуры для увеличения надёжности серийных деталей.

5.3. Оценка стоимости владения дизельной техники при изнашивании распылителей форсунок

В целях обеспечения экономической целесообразности использовать тот или иной вид техники наибольшее предпочтение отдаётся тому, кто способен с максимальной производительностью при минимальных затратах выполнить требуемые работы [91, 110, 205].

Основным экономическим критерием при выборе МТА является себестоимость произведенной продукции. Например, в растениеводстве по итогу сбора урожая зерна все понесённые затраты на его возделывание прямо пропорциональны к весу полученной продукции. С учётом среднерыночной стоимости и объёма реализации зерна предприятие получает прибыль, объём которой во столько раз больше, чем меньше себестоимость от его возделывания. Если стоимость зерна регулирует рынок, то себестоимость его возделывания зависит от выбора ресурсосберегающей технологии и общего количества урожая. В общую себестоимость производства зерна входят затраты на технику, удобрение,

средства защиты, оплату труда, социальные отчисления, хранение зерна и другие накладные расходы.

В рамках данной работы рассмотрим снижение себестоимости владения техникой путём снижения количества отказов распылителей форсунок. На себестоимость владения техникой влияют следующие затраты: амортизация, техническое обслуживание, топливо, персонал, уровень его квалификации и другие накладные расходы, уравнение которых с учётом годовых затрат будет иметь вид:

$$C_{\text{вл}} = A_{\text{Т}} + C_{\text{обс}} + C_{\text{Т}} + C_{\text{п}} + C_{\text{нак}} + C_{\text{расп}} \quad (5.22)$$

где $A_{\text{Т}}$ – годовые амортизационные отчисления, рублей; $C_{\text{обс}}$ – годовые затраты на техническое обслуживание, рублей; $C_{\text{Т}}$ – годовые затраты на топливо, рублей; $C_{\text{п}}$ – годовые затраты на персонал, рублей; $C_{\text{нак}}$ – годовые накладные затраты, рублей; $C_{\text{расп}}$ – годовые затраты на замену распылителей, рублей.

Организация при покупке автотракторной дизельной техники несёт значительные прямые затраты. В целях их снижения предприятие амортизирует технику в течение определённого периода. В случае, если организация не обладает достаточными средствами к приобретению МТА, то пользуется лизингом или арендой техники. Исходя из учётной политики компании, амортизация машин может рассчитываться разными способами: в основном это линейное и нелинейное снижение стоимости путём уменьшения остатка, методом суммы лет или от выработки. В условиях первого приближения стоимости владения техникой рассмотрим линейную амортизацию с уменьшением остатка. Однако эксплуатация техники также требует учёта постоянных годовых затрат на страховку и налоговые отчисления, тогда среднегодовые амортизационные отчисления без учёта инфляции будут выражаться уравнением [72, 228]:

$$A_{\text{Т}} = \frac{C_{\text{н}}}{n} + C_{\text{со}} + C_{\text{но}} \quad (5.23)$$

где $A_{\text{Т}}$ – годовые амортизационные отчисления за технику, рублей; $C_{\text{н}}$ – стоимость новой техники с учётом доставки и утилизационного сбора, рублей;

n – планируемое количество лет амортизации, лет; C_{co} – ежегодные страховые отчисления, рублей; $C_{но}$ – ежегодные налоговые отчисления, рублей.

Стоимость амортизации часа работы дизеля, согласно плановой наработке:

$$A_{\text{мото-ч}} = \frac{A_{\text{г}}}{H_{\text{год}}} \quad (5.24)$$

где $A_{\text{мото-ч}}$ – часовая амортизация за мото-ч работы дизеля, рублей; $H_{\text{год}}$ – плановая годовая наработка, мото-ч.

Для обеспечения высокого коэффициента технической готовности автотракторной техники необходимо вовремя проводить техническое обслуживание и инструктаж операторов по правильной её эксплуатации. Стоимость обслуживания складывается из затрат, понесённых за замену ГСМ, расходных материалов, деталей и узлов, инструмента и специального инвентаря, стоимости работ. При внеплановых простоях машин для обеспечения быстрого их ремонта и выпуска в эксплуатацию необходимо наличие запчастей, что требует содержание склада. В случае гарантийного обслуживания простой техники при наличии запасных частей возможен в течение суток до приезда сервисной службы дилера. Однако в постгарантийный период простой может быть снижен до нескольких часов. В целях предупреждения внеплановых отказов в настоящее время набирает наибольшую популярность метод диагностирования технического состояния узлов и агрегатов машин путём проведения анализа технических жидкостей, на основании чего в результате постоянных наблюдений можно определить ресурс узлов и агрегатов и вовремя выявить неисправность, а также другими способами. На основании вышеизложенного годовые затраты на техническое обслуживание будут выражаться следующим уравнением [201, 232]:

$$C_{\text{обс}} = C_{\text{то}} + C_{\text{и}} + C_{\text{расх}} + C_{\text{ду}} + C_{\text{раб}} + C_{\text{скл}} + C_{\text{л}} + C_{\text{д}} \quad (5.25)$$

где $C_{\text{то}}$ – годовые затраты на техническое обслуживание, рублей; $C_{\text{и}}$ – годовые затраты на инструмент, рублей; $C_{\text{расх}}$ – годовые затраты на расходные материалы, рублей; $C_{\text{ду}}$ – годовые затраты на детали и узлы, рублей; $C_{\text{раб}}$ – годовые затраты на услуги сервиса или содержание механика, рублей; $C_{\text{скл}}$ – годовые затраты на

содержание склада, рублей; C_L – годовые затраты на доставку (логистика) запасных частей и ГСМ, рублей; C_d – годовые затраты на диагностику автотракторной техники, рублей.

Однако продолжительность ремонта и нахождение в простое в течение длительного времени автотракторной техники напрямую влияет на упущенную выгоду организации путём снижения количества и качества проводимых механизированных работ в поле, от которых зависит качественный объём урожая.

Годовые затраты на топливо возможно спрогнозировать, исходя из плановой наработки машины, через норму расхода топлива:

$$C_T = C_L \cdot G_{M-ч} \cdot N_{\Pi} + C_{dT} \quad (5.26)$$

где C_L – среднегодовая стоимость одного литра топлива, рублей/литр; $G_{M-ч}$ – среднечасовое потребление топлива, литр/мото-ч; N_{Π} – плановая годовая наработка дизеля, мото-ч; C_{dT} – годовые затраты на организацию доставки и хранение топлива, рублей.

В целях обеспечения безопасных условий труда предприятие несёт в той или иной степени следующие производственные затраты на работников и обслуживающий персонал: спецодежда, организация медосмотров и питания, доставка персонала до места ведения работы и обратно, оплата труда, премирование, социальные отчисления, страхование жизни и проживание. В соответствии с этим общий вид уравнения годовых затрат на организацию труда:

$$C_{\Pi} = \frac{1}{N} (C_{\text{форм}} + C_{\text{мед}} + C_{\text{пит}} + C_{\text{дост}} + C_{\text{от}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{сж}}) \quad (5.27)$$

где N – общее количество работников и обслуживающего персонала на единицу техники, чел; $C_{\text{форм}}$ – годовые затраты на спецодежду, рублей; $C_{\text{мед}}$ – годовые затраты на организацию медосмотра, рублей; $C_{\text{пит}}$ – годовые затраты на питание персонала, рублей; $C_{\text{дост}}$ – годовые затраты на организацию доставки персонала на рабочие места, рублей; $C_{\text{от}}$ – годовые затраты на оплату труда, рублей; $C_{\text{пр}}$ – годовые затраты на премирование, рублей; $C_{\text{соц}}$ – годовые затраты на

социальные отчисления и налоги, рублей; $C_{\text{прож}}$ – годовые затраты на организацию проживания, рублей.

К накладным расходам можно отнести: обучение и инструктаж операторов, услуги сторонних организаций и другое, тогда общий вид уравнения:

$$C_{\text{нак}} = C_{\text{об}} + C_{\text{орг}} + C_{\text{пр}} \quad (5.28)$$

где $C_{\text{об}}$ – годовые затраты на обучение и инструктаж, рублей; $C_{\text{орг}}$ – годовые затраты на сторонние услуги, рублей; $C_{\text{пр}}$ – годовые затраты на прочее, рублей.

Проведённый анализ надёжности распылителей форсунок показывает, что с вероятностью 50% внеплановый выход их из строя приходится при средней наработке 500 мото-ч по причине износа распыляющих отверстий и направляющей распылителя. Годовая наработка автотракторной техники на примере МТЗ-80 в организации, занимающейся растениеводством и имеющей животноводческий комплекс, со среднесуточной наработкой 8 мото-ч в течение 365 дней, а в период с апреля по октябрь включительно – 12 мото-ч составляет 3776 мото-ч.

На основании статистических данных в год возможно провести до 8 замен распылителей форсунок. Учитывая общую трудоёмкость по замене комплекта распылителей, включающую регулировку впрыска топлива, равного четырём часам, общее годовое время на замену распылителей составит не менее 32 часа. Однако при износе распылителей форсунок в среднем увеличивается расход топлива на 5% и падает мощность двигателя до 20%. Механизаторы в процессе выполнения производственных задач сильнее давят на педаль акселератора, тем самым способствуя увеличению мощности дизеля, сопровождающейся увеличенным расходом топлива. Наряду с этим ухудшается смесеобразование в цилиндрах двигателя, вызывая дымность, коксование и отложение нагара на деталях цилиндропоршневой группы, что совместно влияет на снижение мощности дизеля. Кроме того, в отработанных газах увеличивается содержание токсичных и канцерогенных веществ, которые приводят к массовому загрязнению воздуха, почвы, воды и отравлению операторов эксплуатируемой техники, что

сопровождается быстрой утомляемостью и снижением производительности выполняемой работы. Влияние износа распылителей форсунок на показатели автотракторной техники представлено в параграфе 1.3.

Неисправность топливной аппаратуры сопровождается увеличением расхода топлива, а возрастание количества отказов по этой причине увеличивает время нахождения техники в ремонте. На каждый час простоя предприятие несёт издержки в виде амортизационных отчислений и оплаты труда механику и механизатору. Годовые затраты на простой техники по причине неисправности распылителей форсунок будут определяться следующим уравнением:

$$C_{\text{расп}} = A_{\text{мото-ч}} \cdot H_{\text{рем}} + C_{\text{ТА}} \quad (5.29)$$

где $H_{\text{рем}}$ – время простоя в ремонте по причине неисправности распылителей, час;
 $C_{\text{ТА}}$ – общие затраты, сопровождающиеся заменой распылителя, рублей.

Удельный расход топлива для дизельного двигателя Д-240 с мощностью 59,25 кВт (80 л.с.), устанавливаемого на трактор МТЗ 80 составляет 238 г/кВт х час, отсюда часовой расход топлива на номинальном режиме работы ДВС [139]:

$$G_{\text{ном}} = g_e \cdot N_e \cdot 10^{-3} \quad (5.30)$$

где g_e – удельный расход топлива, г/кВт х час; N_e – эффективная мощность двигателя, кВт.

Исходя из вышеизложенного, среднечасовой расход топлива при замене распылителей составит:

$$G_{\text{ном.изн}} = G_{\text{ном}} \cdot k \quad (5.31)$$

где k – процент увеличения расхода топлива в сравнении с номинальным, %.

При условии, если обнаружена незначительная неисправность распылителей форсунок на 400 мото-ч, а замена осуществилась на 500 мото-ч, то перерасход топлива составит:

$$G_{\text{расх}} = (G_{\text{ном.изм}} \cdot (H_{\text{уст}} - H_{\text{выяв}})) / \rho_{\text{т}} \quad (5.32)$$

где $N_{уст}$ – наработка при устранении неисправности, мото-ч; $N_{выяв}$ – наработка при выявлении неисправности мото-ч; ρ_T – плотность дизельного топлива, кг/литр.

При среднерыночной стоимости топлива 55 рублей за литр и с учётом общего количества замен распылителей, оплаты труда механизатору и механику, а также стоимости запасных частей годовые затраты составят:

$$C_{ТА} = C_T \cdot G_{расх} \cdot n + (C_M + C_O) \cdot t + C_{з/ч} \cdot q \quad (5.33)$$

где C_T – среднерыночная стоимость топлива, рублей; n – количество замен распылителей, раз в год; C_M, C_O – часовая ставка, соответственно, механизатора и механика рублей/час; t – количество часов в ремонте, час; $C_{з/ч}$ – стоимость распылителя, рублей; q – количество распылителей к замене в год, шт.

Уравнение 5.33 в условиях расчёта первого приближения не включает дополнительные затраты на снижение производительности по причине утомляемости оператора, штрафов за нанесение вреда окружающей среде и дополнительных затрат на инструмент и расходные материалы.

Проведя расчёты и подставив значения в вышележащие формулы, получим годовой перерасход топлива:

$$G_{расх} = \frac{(238 \cdot 59 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,05 \cdot (500 - 400)}{0,85} = 82,6 \text{ литра.}$$

В таком случае, дополнительные среднегодовые затраты на обслуживание трактора МТЗ-80 по причине замены распылителей форсунок составят:

$$C_{ТА} = 55 \cdot 82,6 \cdot 8 + (230 + 200) \cdot 32 + 300 \cdot 32 = 59\,704 \text{ рублей,}$$

тогда годовые затраты на замену распылителей составят:

$$C_{расп} = \left(\frac{\left(\frac{C_H}{n} + C_{со} + C_{но} \right)}{H_{год}} \right) \cdot H_{рем} + C_{ТА} = \left(\frac{\left(\frac{2\,680\,992}{7} + 8\,000 + 2\,000 \right)}{3\,776} \right) \cdot 32 + 59\,704 =$$

$$104,08 \cdot 32 + 59\,704 = 63\,034,50 \text{ рублей.}$$

На основании полученных значений и в условиях расчёта первого приближения годовые затраты на эксплуатацию дизеля на серийных распылителях при пересчёте на одну форсунку составят не менее 15 758 рублей.

При эксплуатации дизелей с упрочнёнными деталями распылителя форсунки с учётом износных испытаний наработка составит не менее 10000 мото-ч, что выше в 2,5 раза в сравнении с серийными, предельный ресурс которых, согласно данным изготовителя, составляет 4000 мото-ч. При годовой наработке автотракторного дизеля 3776 мото-ч срок эксплуатации восстановленных и упрочнённых распылителей составит не менее 2,64 года, что позволит сэкономить организациям на каждую единицу дизельной техники более 166 411 рублей.

На рисунке 5.3 представлен график, отражающий минимальный и максимальный ресурс упрочнённых и серийных распылителей. Количество ремонтов рассчитано исходя из наработки упрочнённых распылителей.

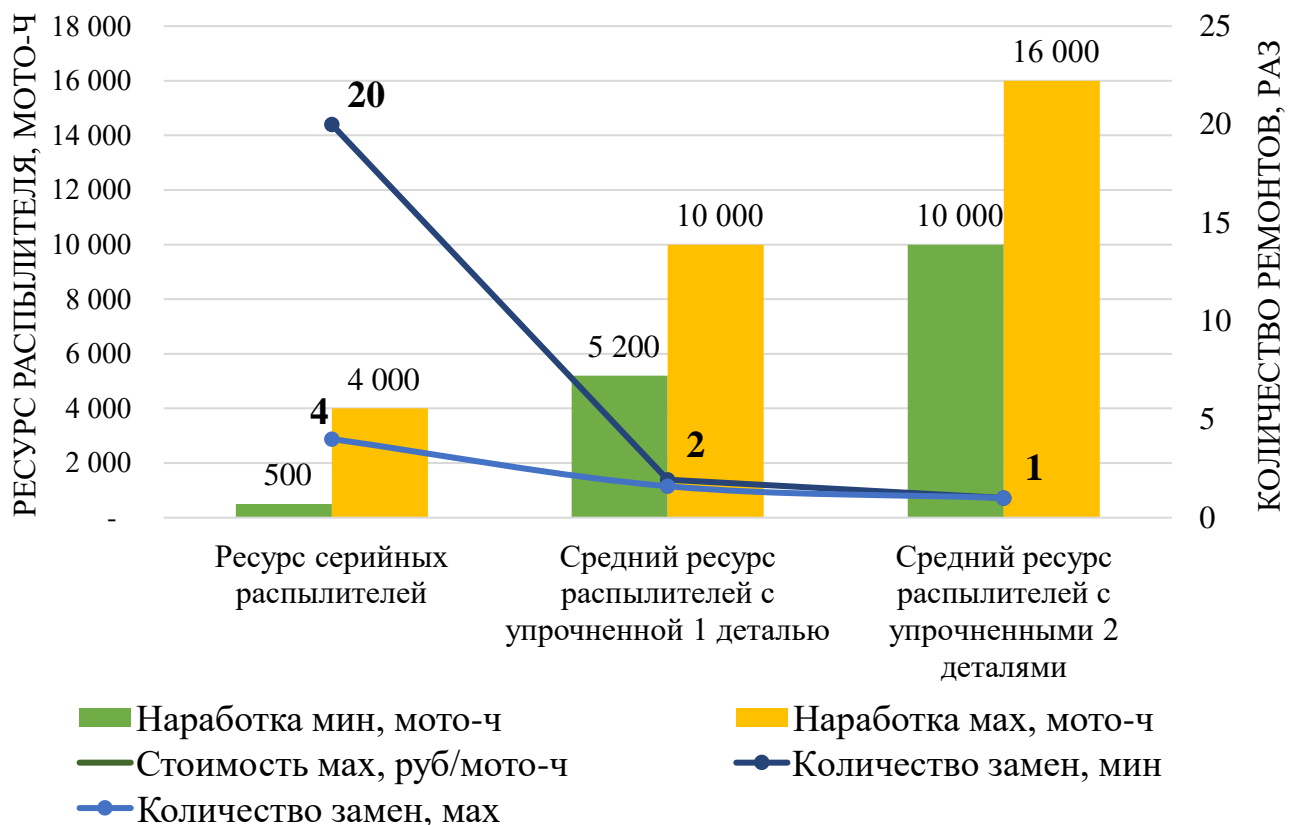


Рисунок 5.3 – Сравнение ресурса серийного и упрочнённого распылителя по наработке и количеству ремонтов.

На рисунке 5.4 представлен приведённый график, отражающий отношение стоимости эксплуатации дизелей на серийных и упрочнённых распылителях. Эксплуатация восстановленных и упрочнённых распылителей с двумя деталями выгоднее по отношению к серийным при минимальной выработке ресурса на 15,52 рублей/мото-ч, а при максимальной на 0,34 рублей/мото-ч. Комплектация распылителей с двумя упрочнёнными деталями по отношению к одной приводит к снижению затрат на их эксплуатацию в 1,6...2,31 раза.

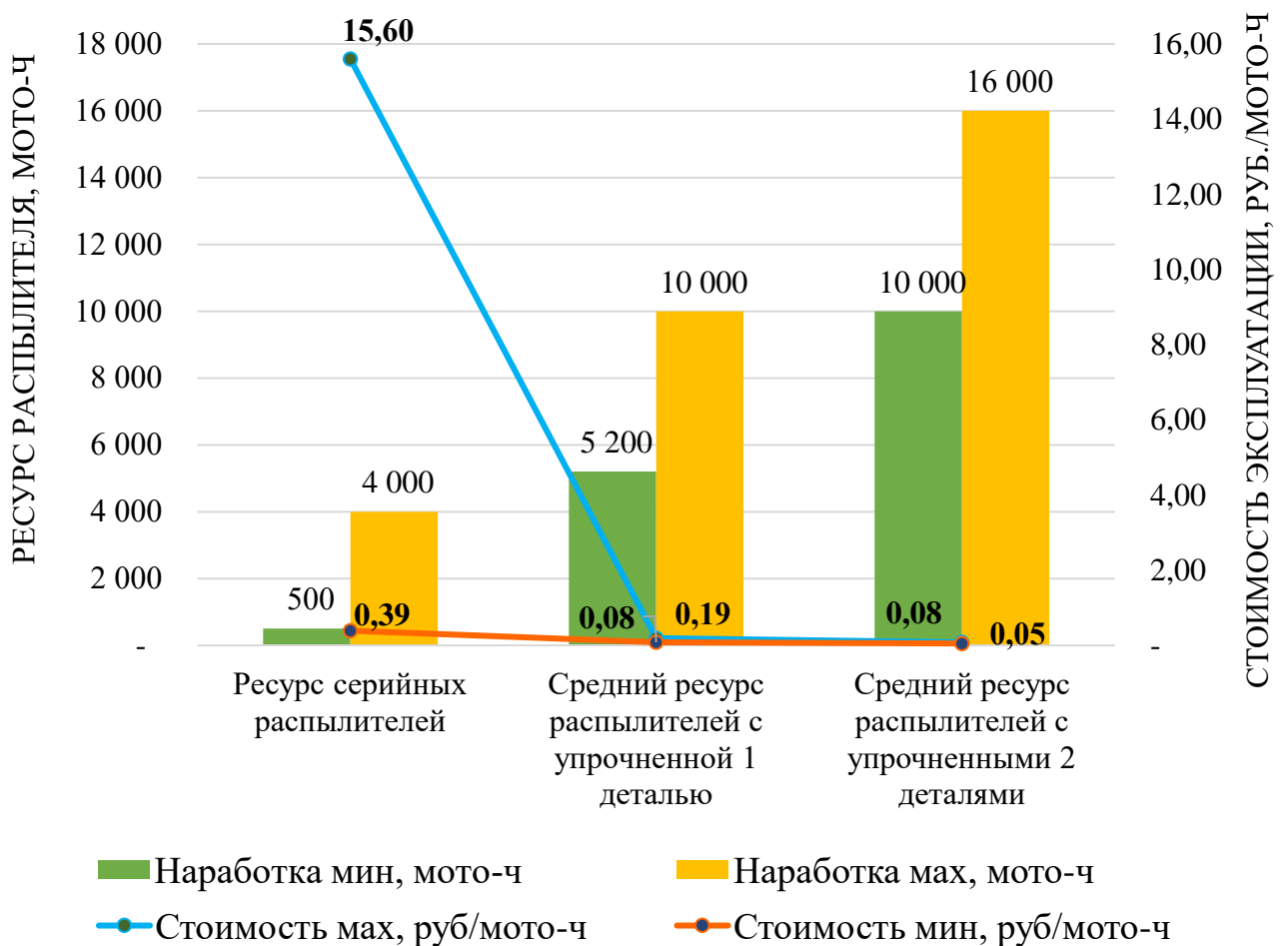


Рисунок 5.4 – Оценочная стоимость серийных и упрочнённых распылителей относительно ресурса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ литературных источников по технологиям восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей показал, что наиболее перспективной является разработка низкотемпературной технологии нанесения карбидохромовых покрытий CVD – методом в вакууме, исключающем коробление прецизионных деталей.

2. Обоснована возможность протекания химических реакций разложения соединений гексакарбонила хрома в реакторе CVD-установки при минимальной температуре нагрева деталей 123 °С и давлении вакуума 0,001 Па с последующим образованием карбидов хрома Cr_3C_2 .

3. Теоретически установлена минимальная толщина покрытия 0,082 мкм при микротвёрдости 16,8 ГПа, которая обеспечивает его несущую способность в условиях гидроабразивного изнашивания.

4. Разработана новая CVD-установка, позволяющая получать карбидохромовые покрытия на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя.

5. Установлен оптимальный режим технологического процесса: остаточное давление 0,025 Па; подача реакционной среды 1,0 л/час при температуре деталей 161 °С; температура паров гексакарбонила хрома 60 °С.

6. Покрытия имеют равномерную по толщине микротвёрдость 18,96 ГПа, шероховатость поверхности не выше Ra0,05. Рентгеноструктурным анализом установлено, что покрытие состоит из карбида хрома Cr_3C_2 с присутствием примесей оксида хрома Cr_2O_3 . Остаточные напряжения в покрытии при толщине 50 мкм составляют 0,56 МПа, при 100 мкм – 0,75 МПа. Прочность сцепления карбидохромового покрытия с подложкой – 34 МПа.

7. На машине трения установлено, что упрочнение опытных образцов приводит к увеличению износостойкости сопряжения в 4,1...5,0 раза в сравнении с

серийными. Покрытие повышает коррозионную стойкость сталей 12Х2Н4А и Р6М5 в кислой среде в 3,5...4 раза, в щелочной – в 6...7 раз.

8. По результатам эксплуатационных испытаний восстановленных распылителей форсунок в течение 575 мото-часов установлено отсутствие отказов.

9. Экономический эффект от внедрения новой технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей на программу 855,5 тыс. штук за 5 лет составит более 85 млн. рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев Б.М. Восстановление нагнетательных клапанов рядных топливных насосов диффузионным хромированием. Дисс ... канд. техн. наук. – М., 1989. – 173 с.
2. Агеев М.А., Вигерина Т.В., Данько К.А. Оценка влияния параметров процесса газотермического напыления покрытий на их свойства путем использования методов математического планирования / М. А. Агеев, Т. В. Вигерина, К. А. Данько [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 3. – С. 35-40. – EDN ZCPRAF
3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий // Издание второе переработанное и дополненное. : Издательство «Наука», М. 1976. – 176 с.
4. Айзикович С.М., Александров В.М., Аргатов И.И. Механика контактных взаимодействий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 672 с. – ISBN 5-9221-0154-4
5. Александров В.М., Чебаков М.И. Введение в механику контактных взаимодействий. – Ростов-на-дону: Изд-во «ЦВВР», 2007. – 114 с.
6. Алмазоподобные углеродные покрытия DLC. Варианты и применение. журнал «РИТМ машиностроения» № 4-2022.
7. Алтайский завод прецизионных изделий <https://azpi.ru/company/>
8. АО «Ярославский завод дизельной аппаратуры» (ЯЗДА) https://sdsyar.ru/tps_production.html
9. Балабанов В.И. Планирование и организация эксперимента / В. И. Балабанов, А. Ли, Н. Б. Мартынова [и др.]. – Ташкент : Бухарский институт управления природными ресурсами Национального исследовательского университета "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства", 2021. – 120 с. – EDN VXJQZK

10. Балабанов В.И. Повышение ресурса дизелей фрикционным латунированием шеек коленчатых валов в ремонтном производстве : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.03. - Москва, 1992. - 19 с. : ил.
11. Балабанов В.И. Применение очистителей топливной системы двигателя / В. И. Балабанов, О. О. Базалий, С. В. Иншаков // Аграрный вестник Приморья. – 2020. – № 3(19). – С. 34-36. – EDN ALWJSK
12. Балабанов В.И. Топливные очистители для двигателя внутреннего сгорания / О. О. Базалий, В. И. Балабанов // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы XII Международной научно-практической интернет-конференции, п. Правдинский Московской области, 08–10 июня 2020 года. – п. Правдинский Московской области: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2020. – С. 522-525. – EDN JPXQBU
13. Балькова Т.И. Разработка методики ускоренных испытаний и прогнозирования долговечности судовых гальванических покрытий / Т. И. Балькова, С. М. Гайдар, А. М. Пикина. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2022. – 178 с. – ISBN 978-5-6048430-1-7. – EDN ZDWVEL
14. Бардадын Н.А. Восстановление и упрочнение прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры диффузионным бороникелированием : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.03. - Москва, 1994. - 278 с. : ил.
15. Барон Н.М., Квят Э.И., Подгорная Е.А. Краткий справочник физико-химических величин // под. Ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя : Изд-во., «ХИМИЯ», М. – 1965. 161 с.
16. Безъязычный В. Ф. Обеспечение показателей качества поверхностного слоя деталей ГТД и их влияние на эксплуатационные свойства.: Учебное пособие. – Рыбинск: ОАО «НПО«Сатурн», 2004. –314 с.
17. Белонучкин В.Е. Краткий курс термодинамики / В.Е. Белонучкин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: МФТИ, 2010 — 164 с.

18. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука» ., 1976 – 608 с.
19. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 624 с.
20. Богачев Б.А. Восстановление распылителей форсунок автотракторных дизелей диффузионным контактным хромированием в вакууме: диссертация канд. техн. наук. – М., 1987. – 300 с.
21. Болдин Н.И. Диффузионное борохромирование как метод восстановления и упрочнения деталей топливной аппаратуры дизелей (на примере плунжерных пар топливных насосов типа УТН) : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.03. - Москва, 1991. - 19 с. : ил.
22. Болотоков А.Л. Повышение долговечности форсунок дизельных двигателей сельскохозяйственной техники модернизацией иглы распылителя диссертация канд. техн. наук. - Нальчик, 2019., 157 с.
23. Борисов Г.А. Повышение ресурса прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры нанесением на их поверхность гальваногазофазного хрома: монография / Г.А. Борисов, Е.Е. Семенова, В.В. Миронов. – Рязань: РГАТУ им. П.А. Костычева, 2011. – 172 с.
24. Брусенцева Л.Ю., Кудряшова А.А. Краткий справочник физико-механических величин некоторых неорганических и органических соединений. Сост.: Л.Ю. Брусенцева, А.А. Кудряшова – Самара: НОУ ВПО СМИ «РЕАВИЗ», 2011. 68 с.
25. Бугаев В.Н. Повышение долговечности плунжерных пар / В. Н. Бугаев, С. П. Казанцев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – № 1. – С. 29-30. – EDN ZFDGEV
26. Быков Ю.А. Определение твёрдости нанопокровов : учеб. пособие по курсу «Современные методы исследования структуры материалов» / Ю.А. Быков, С.Д. Карпучин, В.М. Полянский ; под ред. Ю.А. Быкова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. — 31, [1] с. ил.

27. Вайтехнович П.Е. Ударно-абразивное изнашивание лопастей ротора центробежной мельницы // Вестник полоцкого государственного университета., Серия В., БГТУ, Минск, 2018 – 84 – 89 с.
28. Варнаков Д. В. Теоретические основы концепции технического сервиса машин по фактическому состоянию на основе оценки их параметрической надежности / Д. В. Варнаков, О. Н. Дидманидзе // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 2(57). – С. 67-71. – EDN YHPGUR
29. Вертикальные хонинговальные станки и инструменты KADIA Production/ <https://www.directindustry.com.ru/prod/kadia-production/product-27734-788095.html>
30. Витюнин М.А., Чикова О.А. Сопротивление материалов: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению «Педагогическое образование» (профиль «Технология») / Урал. гос. пед. ун-т. – Екатеринбург, 2014 – 136 с.
31. Влияние кавитационного воздействия на углеводородное топливо / А.Ф. Немчин [и др.] // Пром. теплотехника. – 2002 – Т. 24, № 6 – С. 60–63.
32. Внутришлифовальные станки для шлифования радиусов STUDER S121/S131/S141 · Printed in Switzerland · V1 · 02/2018.ru
33. Волков В.Л., Сыркин В.Г., Толмаский И.С. Карбонильное железо : изд-во «Металлургия», М., 1969 – 256 с.
34. Гайдар С. М. Технология конструкционных материалов / С. М. Гайдар, А. М. Колокатов, А. М. Пикина. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2021. – 282 с. – ISBN 978-5-6047495-4-8. – EDN RRQQOF
35. Гайдар С.М. Влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства высокопрочной низколегированной стали / В. А. Дудко, Д. Ю. Юзбекова, С. М. Гайдар [и др.] // Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения : Тезисы докладов Международной конференции, Томск, 05–08 сентября 2022 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный

исследовательский государственный университет, 2022. – С. 124. – DOI 10.25205/978-5-4437-1353-3-72. – EDN PPCULJ

36. Гайдар С.М. Исследование коррозионной стойкости элементов топливной системы автотракторной техники при воздействии климатических факторов / С. М. Гайдар, О. Н. Дидманидзе, А. Г. Пастухов, И. А. Посунько // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2020. – № 2(26). – С. 37-47. – EDN WZOLLP

37. Гайдар С.М. Планирование и анализ эксперимента: учебник. – М.: изд-во ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 548 с.

38. Гайдар С.М. Прогнозирование фрикционно-износных характеристик трибосистем с использованием физического моделирования контактного взаимодействия подвижных соединений / С. М. Гайдар, А. Б. Лагузин, А. Г. Пастухов, А. М. Пикина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 2(30). – С. 98-107. – EDN HUBVTK

39. Гайдуков В.Ф., Колесник В.П., Литовченко Л.В. Проектирование и расчёт вакуумных систем испытательных стендов и технологических установок / В.Ф. Гайдуков, В.П. Колесник, Л.В. Литовченко, В.В. Колесник, Д.В. Слюсарь. – Курс лекций для высших технических учебных заведений. - Киев: «Миллениум», 2009. – 172 с.

40. Галдин Н.С. Основы гидравлики и гидропривода: Учебное пособие. – Омск: Изд-во «СибАДИ», 2006. – 145 с.

41. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. – 4-е изд., перераб. И доп. – М.: «Издаельствл МСХА», 2001. 616 с., ил. 280.

42. ГОСТ 10007-80 Фторопласт – 4. Технические условия. – М.: Стандартиформ. 2005. – 16 с.

43. ГОСТ 10292-74 Стеклотекстолит конструкционный. Технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2005. – 16 с.

44. ГОСТ 10579-2017 Форсунки дизелей. Технические требования и методы испытаний. Стандартиформ. 2018 – 12 с.

45. ГОСТ 10998-2016 Прутки из бескислородной меди для электровакуумной промышленности. Технические условия. – М.: Стандартиформ. 2017. – 15 с.
46. ГОСТ 11098-75 Скобы с отсчётным устройством. Технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 10 с.
47. ГОСТ 12.2.120–2015 Система стандартов безопасности труда. Кабины и рабочие места операторов тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. Общие требования безопасности // Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартиформ, 2016 – 15 с.
48. ГОСТ 13344-79 Шкурка шлифовальная тканевая водостойкая. Технические условия. ИПК Издательство Стандартов. Москва – 2003.
49. ГОСТ 1412-85 Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 5 с.
50. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартиформ. 2010. – 71 с.
51. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М. : Стандартиформ, 2011. – 26 с.
52. ГОСТ 17.2.2.02–98 Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин // Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск, 1998 – 15 с.
53. ГОСТ 17216-2001 Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. – Минск : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 12 с.
54. ГОСТ 18143-72 Проволока из высоколегированной коррозионной и жаростойкой стали. Технические условия. – М.: Стандартиформ. 2015. – 7 с.
55. ГОСТ 19265-73 Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 23 с.

56. ГОСТ 20779-2022 Масла индустриальные. Технические условия. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 10 с.
57. ГОСТ 2138-91 Пески формовочные. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2005. – 8 с.
58. ГОСТ 2590-2006 Прокат сортовой стальной горячекатанный круглый. Сортамент. . – М. : Стандартиформ. 2012. – 18 с.
59. ГОСТ 2789-73 Межгосударственный стандарт шероховатость поверхности. / Электронный текст документа подготовлен АО "Кодекс" и сверен по: официальное издание М.: Стандартиформ, 2018.
60. ГОСТ 28798-90 Головки измерительные пружинные. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ. 2005. – 7 с.
61. ГОСТ 305-2013 Топливо дизельное. Технические условия.
62. ГОСТ 4543—61 Сталь легированная конструкционная. Марки и технические требования.
63. ГОСТ 4543-71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. – М. : Стандартиформ. 2008. – 41 с.
64. ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные марки. Межгосударственный стандарт. – М. : Стандартиформ. 2015. – 52 с.
65. ГОСТ 6370-83 Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей.
66. ГОСТ 8669-88 Форсунки дизелей. Общие технические условия. ИПК Издательство Стандартов. Москва – 2004.
67. ГОСТ 9.014-78 Временная противокоррозионная защита изделий. Общие требования. – М.: Стандартиформ. 2005. – 60 с.
68. ГОСТ 9450-76 Изменение микротвёрдости вдавливания алмазных наконечников. Издательство Стандартов, Москва.
69. ГОСТ 9941-81 Трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионностойкой стали. Технические условия. – М. : Стандартиформ. 2010. – 18 с.

70. Готовцева Т.А. Комбинированная очистка топлива в топливных системах машин: дисс. к.т.н: 05.20.03. – М., 2013.
71. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений / А.А. Грешилов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
72. Грибов В.Д. Экономика предприятия: учебник / В. Д. Грибов, В. П. Грузинов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Финансы и статистика, 2006. - 336 с. - ISBN 5-279-02847-9
73. Гусейнов А.Г. Повышение работоспособности деталей машин и аппаратуры путём восстановления и упрочнения диффузионной металлизацией : диссертация ... доктора технических наук : 05.02.08. - Москва, 2002. - 339 с. : ил.
74. Данилин Б.С. Минайчев В.Е. Основы конструирования вакуумных систем. Под общ. ред. Р.А. Нилендера. М., «Энергия», 1971 – 393 с.
75. Денисов В. А. Оценка эксплуатационной надежности восстановленных деталей по результатам ускоренных стендовых испытаний / В. А. Денисов, Р. Н. Задорожний // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 127. – С. 160-165. – EDN YRTQTI
76. Дидманидзе О.Н. Концепция технического сервиса по фактическому состоянию машин на основе оценки их параметрической надежности / О. Н. Дидманидзе, Д. В. Варнаков, В. В. Варнаков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2016. – № 2(72). – С. 51-57. – EDN VSKLQN
77. Дидманидзе О.Н. Способы оценки технического состояния ЦПГ двигателя / О. Н. Дидманидзе, С. Н. Девянин, А. И. Сучков // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2022 года. Том Часть 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2022. – С. 7-19. – EDN XULKGK
78. Дидманидзе О.Н. Тенденции развития цифровых технологий диагностирования технического состояния тракторов / О. Н. Дидманидзе, А. С. Дорохов, Ю. В. Катаев // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 11(281). – С. 39-43. – DOI 10.33267/2072-9642-2020-11-39-41. – EDN SUTTJS

79. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Ступников В.П. Методы факторного планирования эксперимента в обработке давлением // МГТУ им. Н. Э. Баумана., М.: 1999. – 105 с.
80. Доклад Председателя Комитета Государственной Думы по аграрным вопросам, академика РАН В.И. Кашина на Всероссийском агрономическом совещании на тему «О предварительных итогах работы отрасли растениеводства за 2022 год и задачах на 2023 год», М., – 2023.
81. Дорохов А.С. Влияние кавитации на рабочие поверхности цилиндропоршневой группы дизельного двигателя при техническом обслуживании / А. С. Дорохов, Ю. В. Катаев, Е. А. Градов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 8. – С. 30-34. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-8-30-34. – EDN EGMMGN
82. Дорохов А.С. Патент № 2733105 С1 Российская Федерация, МПК G01M 13/00, G01M 15/00. Способ определения остаточного ресурса деталей машин : № 2019137166 : заявл. 20.11.2019 : опубл. 29.09.2020 / А. С. Дорохов, В. А. Денисов, А. А. Соломашкин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ). – EDN VNXWZG
83. Дроздов И.А. Термообработка и стойкость штамповых сталей; Методические указания / Сост. И.А. Дроздов, Рецензент А. И. Заббаров. – Самара: СГАУ, 2002. - 68 с.
84. Дружинин О.А. Исследование динамики вихревых потоков и волн в дисперсных и стратифицированных средах. Дис. докт. физ.-мат. наук. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2004. 300 с.
85. Ерохин М.Н. Диффузионные покрытия в ремонтном производстве / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Московский гос. агроинженерный ун-т им. В.П. Горячкина. – М. : ФГОУ ВПО МГАУ, 2006. – 124 с.: ил., табл.

86. Ерохин М.Н. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин: монография/ М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Н.Н. Чупятов. – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. – 140 с.

87. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Пастухов А.Г., Скороходов Д.М., Логачёв К.М. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16. №3. С. 4-11.

88. Ерохин М.Н., Плетьнёв Л.В., Чупятов Н.Н. Управление процессом формирования карбидохромовых CVD-покрытий на внешней поверхности цилиндрической подложки // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 124. №3. С. 26-34. EDN: WWRUIZ

89. Ерохин М.Н., Чупятов Н.Н., Казанцев С.П. Применение карбонильного хрома для получения упрочняющих покрытий на деталях сельскохозяйственной техники. В сборнике: Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организация технического сервиса в АПК. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Белорусского государственного аграрного технического университета и памяти первого ректора БИМСХ (БГАТУ) д-ра техн. наук, проф. В.П. Сулова. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Республиканское объединение «Белагросервис»; под общей редакцией И.Н. Шилю, Н.А. Лабушева. 2014. С. 275-278.

90. Железнов Е.В. Электроосаждение хромовых покрытий из хромовокислых электролитов в присутствии дисперсных фаз вюрцитоподобного VN, TiN, WC и детонационных алмазов: дис... канд. техн. наук: М., 2017., 197 с.

91. Зангиев А.А., Скороходов А. Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 464 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978-5-8114-2097-1

92. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С. В. Звонарев. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 112 с. ISBN 978-5-7996-2576-4
93. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: Учеб. Пособие для ВУЗов / В. А. Звонов. — 2-е изд., перераб. и доп.: — М.: Машиностроение, 1981 — 154 с.
94. Информационно-аналитический материал «О совершенствовании сельскохозяйственной техники и анализе отказов, выявленных в ходе испытаний за 2021-2022 годы в соответствии с постановлением Правительства № 740» // МСХ РФ., Солнечногорск – 2022 г.
95. Исследование поверхностного слоя деталей методом измерения микротвёрдости // Методическое пособие для выполнения лабораторной работы аспирантами направления 15.06.01 – Технология машиностроения по дисциплине «Физические основы технологических процессов механической и физико-технической обработки». : Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева Кафедра «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения», Рыбинск, 2014. – 20 с.
96. Ишанходжаева М.М., Смирнова А.И. Физическая химия. Примеры решения типовых задач по курсу физической химии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2017. – 77 с.
97. Казанцев С.П. Восстановление изношенных деталей многокомпонентной диффузионной металлизацией / С. П. Казанцев, В. А. Прилепин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – № 4. – С. 31-32. – EDN ZFDGMN
98. Казанцев С.П. Восстановление плунжерных пар топливных насосов распределительного типа диффузионным хромонитридными покрытиями: дис. ... канд. техн. наук: / Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, М., 1988.

99. Казанцев С.П. Новая технология получения комбинированных диффузионных покрытий / С. П. Казанцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2003. – № 7. – С. 30-32. – EDN ZFDIGH
100. Казанцев С.П. Технология восстановления деталей сельскохозяйственной техники нанесением железоборидных покрытий / С. П. Казанцев, В. Н. Боярский, О. П. Андреев // Техника в сельском хозяйстве. – 2001. – № 2. – С. 34-35. – EDN WRPZFI
101. Казанцев С.П., Кочетов Э.И., Понин А.И. Изменение шероховатости поверхности при диффузионном хромировании стали / Труды МИИСП. – М.: МИИСП, 1997. – С. 41...43.
102. Казанцев С.П., Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей с/х техники: дисс. д. т. н / МГАУ им. В.П. Горячкина, М., 2006.
103. Казанцев С.П. Восстановление деталей комбинированными диффузионными покрытиями / С. П. Казанцев // Техника и оборудование для села. – 2004. – № 3. – С. 15. – EDN ZFDJXJ
104. Калинин В.В., Белянкова Т.И. Динамические контактные задачи для предварительно напряженных полуограниченных тел. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 240 с.
105. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика // второе издание : Государственное научно-техническое издательство химической литературы., М., 1953 – 316 с.
106. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г.А. Кардашев. – М. : Химия, 1990 – 208 с.
107. Катаев Ю.В. Способ организации технического обслуживания и ремонта деталей сельскохозяйственной техники / Ю. В. Катаев, А. А. Соломашкин, В. С. Герасимов // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 5. – С. 67-72. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-5-67-72. – EDN SBHAJZ
108. Катаев Ю.В. Анализ факторов, влияющих на нагарообразования в ДВС / Ю. В. Катаев, В. М. Корнеев // Сборник статей по итогам II международной

научно-практической конференции "ГОРЯЧКИНСКИЕ ЧТЕНИЯ", посвященной 150-летию со дня рождения академика В.П. Горячкина, Москва, 18 апреля 2018 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. – С. 256-261. – EDN OSCBWR

109. Катаев Ю.В. Прогнозирование отказов в двигателях сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий / М. Г. Загоруйко, И. А. Тишанинов, Е. А. Градов // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 2. – С. 79-82. – DOI 10.28983/asj.y2022i2pp79-82. – EDN ZYCIWA

110. Кленин Н.И., Саун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины – М.: Колос, 1994. – 751 с.: ил. – (Учебники и учеб. пособия для высш. учеб. заведений). ISBN 5-10-001744-9

111. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М. : Физматлит, 2006. – 816 с.

112. Козырев В.В. Кинетика получения наноструктурированных износостойких покрытий CVD-методом металлоорганических соединений никеля / В.В. Козырев, Н.Н. Чупятов, Л.В. Козырева // Сборник трудов конференции: Инновационные и нанотехнологии в системе стратегического развития АПК региона / ТГСХА. – Тверь, 2013. – С. 179-183.

113. Козырев В.В. Металлоорганические соединения в машиностроении и ремонтном производстве. — Тверь: Студия-С, 2003. — 160 с.

114. Козырева Л.В. Повышение производственной безопасности CVD-метода металлоорганических соединений при восстановлении деталей машин / Л. В. Козырева, В. В. Козырев, Н. Н. Чупятов, Н. А. Филиппова // V международный Балтийский морской форум : материалы форума, Калининград, 21–27 мая 2017 года / Составитель Кострикова Н.А.. – Калининград: Обособленное структурное подразделение "Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Калининградский государственный технический университет", 2017. – С. 924-929. – EDN YRSQJR

115. Козырева Л.В. Применение CVD-метода металлоорганических соединений никеля при создании композиционных материалов и покрытий / В.В. Козырев, Л.В. Козырева, Н.Н. Чупятов. // Технология машиностроения. – 2008. – №2 (68). – С. 5-8.

116. Колчин А.В., Каргиев Б.Ш. Инструментальный контроль технического состояния тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин при эксплуатации // Российская академия сельскохозяйственных наук. – М.: ГОСНИТИ, 2003 – 75 с.

117. Кондратьева Д.А. Органические синтезы через карбонилы металлов // перевод с английского: канд. хим. наук Д.А. Кондратьева., Изд-во «МИР». Москва – 1970 Irving Wender. Organic syntheses via metal carbonyls / Volume I, Interscience publishers., New York - 1968.

118. Коновалов А.В., Пичугин В.Ф., Елагина О.Ю. Методика выбора сталей для их использования в условиях скольжения по закрепленному абразиву // РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина., Нефтегазовое дело, 2004 – 12 с.

119. Кононюк А.Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента) – В 4-х кн.-К.2. –К.: 2011. – 452 с.

120. Конюхов В.Ю. Сборник задач по физической химии. Электрохимия, химическая кинетика: учебное пособие / В. Ю. Конюхов, А. В. Гребенник, А. Ю. Крюков, О. И. Воробьева. –М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2021 – 224 с. ISBN 978-5-7237-1874-6

121. Корнеев В.М. Методологические основы технологического оснащения предприятий технического сервиса / В. М. Корнеев, И. Н. Кравченко, Д. И. Петровский // Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России : Материалы Национальной научно-практической конференции, Рязань, 22 ноября 2018 года. Том Часть 1. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2019. – С. 207-210. – EDN FKJSRR

122. Корнеев В.М. Обоснование выбора ремонтно-технологического оборудования сервисных предприятий / В. М. Корнеев, И. Н. Кравченко, Д. И.

Петровский // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Мичуринск, 24–26 октября 2018 года / Под общей редакцией В.А. Солопова. – Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2018. – С. 108-110. – EDN YWGZLN

123. Корнеев В.М., Кравченко И.Н., Новиков В.С. Технология ремонта машин : учебник для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» / В. М. Корнеев, И. Н. Кравченко, В. С. Новиков [и др.]. – Москва : Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. – 266 с. – ISBN 978-5-9675-1713-6. – EDN GRGJOO

124. Королёв А.Е., Распределение отказов двигателей. Журнал: NovaUm №10, 30.11.2017., <http://novaum.ru/public/p412>

125. Коротков П.Ф. Молекулярная физика и термодинамика. Основные положения и решения задач: Учебное пособие. - 2-е изд. -М.: МФТИ, 2004. - 168 с. ISBN 5-7417-0229-5

126. Коссов В.В. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: (Вторая редакция) /М-во экон. РФ, ГК по стр-ву, архит. И жил. Политике; рук. Авт. Кол.: Коссов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. – М.: ОАО «НПО «Изд-во «Экономика», 2000. – 421 с. ISBN 5-282-01987-6

127. Костерев В.В. Надежность технических систем и управление риском / В.В. Костерев. – М.: Мифи, 2008. — 280 с.

128. Костржицкий А.И. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / Машиностроение, М., 1991 – 176 с.

129. Кочетов Э.И. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники диффузионным хромированием с применением термоциклической обработки: дис... канд. техн. наук: М., 1992., 208 с.

130. Кравченко И.Н. Методика определения характеристик упругости и остаточных напряжений в плазменных покрытиях / И. Н. Кравченко, С. В. Карцев, Ю. А. Кузнецов, Ю. В. Катаев // Технический сервис машин. – 2022. – № 2(147). – С. 165-177. – DOI 10.22314/2618-8287-2022-60-2-165-177. – EDN JCEPGT

131. Кравченко И.Н. Очистка поверхностей деталей при их восстановлении / И. Н. Кравченко, А. Ф. Сливов, В. М. Корнеев, Ю. В. Катаев // Сельский механизатор. – 2019. – № 8. – С. 38-40. – EDN UTRAGQ

132. Кравченко И.Н. Основы организации технического сервиса в агропромышленном комплексе : Учебник / И. Н. Кравченко, Ю. А. Кузнецов, А. В. Коломейченко [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "КноРус", 2022. – 452 с. – (Бакалавриат и магистратура). – ISBN 978-5-406-08940-8. – EDN WHVHKI

133. Кравченко И.Н. Разработка высокоэффективных плазменных технологий восстановления и упрочнения деталей технологического оборудования свеклосахарного производства : Научно-методические рекомендации / И. Н. Кравченко, С. В. Карцев. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2022. – 60 с. – ISBN 978-5-907464-28-5. – DOI 10.37738/VNIIGIM.2022.39.80.001. – EDN RWXJYN

134. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчётов на трение и износ. М., «Машиностроение», 1977., 526 с.

135. Кривобоков В.П. Плазменные покрытия (свойства и применение): учебное пособие / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.

136. Круглякова Л.А., Голубцова О.А. Расчёт термодинамических характеристик химических процес: сб. задач для студентов бакалавриата по направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 19.03.01 «Биотехнология», 20.03.01 «Техносферная безопасность» всех форм обучения и специальности 18.05.01 «Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий» очной формы обучения / авт.-сост. : Л. А. Круглякова, О. А. Голубцова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2022 – 100 с.

137. Кузовлев В.П., Подаева Н.Г. Курс геометрии: элементы топологии, Дифференциальная геометрия, Основания геометрии. - М.: АВРМАТЛИТ, 2012. - 208 с.
138. Курочкин В.Е., Шарфарец Б.П., Шарфарец Е.Б. Обзор математических моделей, описывающих процесс транспорта примесей и одиночных частиц в потоке жидкости: НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2015, том 25, № 4, с. 36–42. ISSN 0868–5886
139. Кутьков Г.М., Богатырев А.В. Тяговый расчёт трактора: методические указания РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2018. – 80 с.
140. Левшин А.Г. Теория инженерного эксперимента: Методические рекомендации // А.Г. Левшин, Н.А. Майстренко - М., 2020. - 65 с.
141. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов // М. «Металлургия», 1980. 320 с.
142. Лидин Р.А. и др. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. — 3-е изд., испр. — М.: Химия, 2000. — 480 с. — ISBN 5-7245-1163-0
143. Липин В.А., Липин А.Б., Слободов А.А., Суставова Т.А. Задачи по химической термодинамике: учебно-практическое пособие / ВШТЭ СПбГУПТД – СПб., 2017 – 83 с.
144. Лиханов В.А. Снижение токсичности и улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путём применения метанола : монография / В. А. Лиханов. - Киров : [б. и.], 2001 - 212 с. - ISBN 5-7352-0060-7
145. Лобанов М.Л. Защитные покрытия : учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с. ISBN 978- 5-7996-1101-9
146. Логачёв К.М. Анализ способов восстановления деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей / Д. М. Скороходов, О. В. Чеха, К. М. Логачев // Научно-исследовательские публикации. – 2022. – № 3. – С. 61-65. – EDN BUSYJY
147. Логачёв К.М. Влияние износа деталей распылителей форсунок на показатели автотракторных дизелей / Материалы Международного молодежного

научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020». – М.: МАКС Пресс, 2020. Второе издание: переработанное и дополненное [Электронный ресурс]. ISBN 978-5-317-06519-5

148. Логачёв К.М. Модернизация CVD-установки для осаждения карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки дизельных двигателей. *Агроинженерия*. 2023; 25(3): 84-90. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-84-90>

149. Логачёв К.М. Применение программы FLOW VISION для проведения виртуальных испытаний топливной аппаратуры дизелей // семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского» РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.: М. –2023. – С. 324 – 329.

150. Логачёв К.М. Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки: RU 216021 U1 : МПК51 С23С 16/32, С23С 16/54 / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, Н. Н. Чупятов, И. Ю. Игнаткин, Д. М. Скороходов, К. М. Логачёв; патентообладатель ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». - №2022120149; заявка 22.07.2022; опубл. 13.01.2023, Бюл. №2 – 9 с.

151. Логачёв К.М., Скороходов Д. М. Факторы, влияющие на образование карбидохромового покрытия на деталях распылителей форсунок автотракторных дизелей при термическом разложении гексакарбонила хрома / Д. М. Скороходов, К. М. Логачев // *Заметки ученого*. – 2023. – № 3. – С. 185-190. – EDN BYXLMV

152. Локтев Д., Ямашкин Е., Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий // *Промышленные нанотехнологии*. : Наноиндустрия – 2007.

153. Лужнов Ю.М., Калачёв Ю.Н., Александров В.Д., Морщилов М.В. Анализ видов изнашивания рабочих поверхностей деталей: учебно-методическое пособие / Ю.М. Лужнов [и др.]. – М.: МАДИ, 2018. – 48 с.

154. Лялякин В.П. Восстановление деталей машин в агропромышленном комплексе. Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного

комплекса. Коллективная монография. Под редакцией В.В. Окоркова. Иваново. 2019. С. 254-258.

155. Лялякин В.П. Выбор метода восстановления изношенных поверхностей деталей / В. П. Лялякин, В. А. Денисов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14, № 12(168). – С. 536-539. – EDN YPWFHN

156. Мазаев Ю.В. Ремонт форсунок дизелей. / Ю.В. Мазаев, Н.В. Корнеев, Е.А. Петровская // Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ. – М.: ФГОУ ВО МГАУ, 2005. – 18 с.

157. Малыха Е.Ф. Критерии формирования и развития вторичного рынка подержанной сельскохозяйственной техники / Е. Ф. Малыха, Ю. В. Катаев, О. В. Закарчевский, В. А. Тарасова // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2021. – № 6(75). – С. 103-109. – DOI 10.33938/216-103. – EDN ANHRJO

158. Мансуров Г.Н., Петрий О.А. Электрохимия тонких металлических пленок. Монография. -М.: МГОУ, 2011. -351 с.

159. Марков В.А. Улучшение экологических характеристик дизельного двигателя при работе на водно-биотопливной эмульсии / В.А. Марков, С.Н. Девянин, С.А. Нагорнов, Е.Ю. Левина // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 11. – С. 3-6.

160. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 376 с.

161. Марков Д.П. Трибология и её применение на железнодорожном транспорте / Труды ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2007. – 408 с.

162. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

163. Марочник сталей и сплавов / сост.: Ю.Г. Драгунов [и др.]; под ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2015. 1215 с.

164. Математическая теория планирования эксперимента / под ред. С.М. Ермакова. М.: Наука, 1983.

165. Махкамов К.Х. Расчёт износостойкости машин. Учебное пособие. Ташкент: ТашГТУ, 2002. - 144 с.
166. Межецкий Г.Д. Сопротивление материалов: Учебник / Г.Д. Межецкий, Г.Г. Загребин, Н.Н. Решетник; под общ. Ред. Г.Д. Межецкого, Г.Г. Загребина.- 5-е изд., - М. 2016.- 432 с.
167. Мельников О.М., Казанцев С.П., Чеха О.В. Оценка показателей качества деталей и соединения "вал-манжета"/ Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2019. № 5 (93). С. 8-13.
168. Микротвёрдость абразивных материалов <http://gravbiz.ru/informaciya-chpu/241-mikrotverdost-abrazivnyh-materialov.html>
169. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: Физматиздат, 1960. – 326 с.
170. Михеева Е.В., Асташкина А.П. Сборник задач по физической и коллоидной химии: учебное пособие / Е.В.Михеева, А.П.Асташкина; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012 – 193 с.
171. Мокроусов Д.С. Двигатели ЯМЗ-236М2, ЯМЗ-238М2 // Руководство по эксплуатации 236-3902150-Б РЭ Ярославль : ПАЛ «Автодизель» (ЯМЗ)., 2017. – 188 с.
172. Мокроусов Д.С. Силовые агрегаты ЯМЗ-236НЕ2, ЯМЗ-236НЕ и другие // Руководство по эксплуатации 236Н-3902150 РЭ Ярославль : ПАЛ «Автодизель» (ЯМЗ)., 2017. – 409 с.
173. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения: Машиностроение, М., 1999 – 544 с.
174. Московских Л.А., Акулиничев Е.В., Головачева Ю.Г. Определение микротвёрдости: методические указания к лабораторной работе № 2 по курсу «Материаловедение». — М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — 20 с.

175. Мошкович А.Д. Повышение надёжности регулятора частоты вращения при ремонте топливных насосов типа УТН. Автореф. дис...канд. техн. наук. – М., 1989. – 17 с.
176. Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие. Учебное пособие / В.И. Балабанов, А.И. Беленков, Е.В. Березовский. – М.: Издательство РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2013. – 117 с.: ил.
177. Наумов Г.Б., Рыженко Б. Н., Ходаковский И.Л. Справочник термодинамических величин (для геологов). М., Атомиздат, 1971 – 240 с.
178. Несмеянов А.Н., Кондратьев Д.П. Органические синтезы через карбонилы металлов. – М.: Мир, 1970. – 376 с.
179. Нестеренко А.И. Возможность крекинга углеводородов под действием кавитации. Количественная энергетическая оценка / А.И. Нестеренко, Ю.С. Берлиозов // Химия и технология топлив и масел. – 2007 – № 6 – С. 43–44.
180. Новик Ф.С. Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. : Машиностроение, М.: 1980. – 306 с.
181. Новиков В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: монография / ИНФРА-М, 2019. — 155 с.
182. Новиков Е.А. Новый метод контроля содержания абразивных частиц в дизельных топливах // Аналитический контроль нефти и нефтепродуктов neftemir.ru: Мир нефтепродуктов №6. – 2020. – 34 – 38 с.
183. Ноздрин И.В. Разработка научных основ и технологии плазмометаллургического производства нанопорошков борида и карбида хрома // дис. д.т.н. – Новокузнецк – 2015. – 323 с.
184. Отчёт о выполнении государственного задания за 2022 год ФГБУ «ГИЦ» // Солнечногорск – 2022 г.
185. Петрик Д.Ю. Факторы интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах (на примере ультразвукового метода очистки) / Д. Ю. Петрик, В. М. Корнеев, В. Ю. Петрик // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 1(127). – DOI 10.23670/IRJ.2023.127.24. – EDN CLXBCL

186. Полякова Н.С. Математическое моделирование и планирование эксперимента : метод. указания к выполнению домашнего задания. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 33, [3] с.
187. Постановление Правительства Российской Федерации от 01.08.2016 г. № 740. Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования: офиц. текст. М., 2016. 35 с.
188. Потехин Б.А. Металловедение: учебное пособие / Б.А. Потехин. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2019. - 99 с. ISBN 978-5-94984-707-7
189. Предварительные итоги работы отрасли растениеводства за 2022 год и задачи на 2023 год: Всероссийское агрономическое совещание., М., – 2023.
190. Промтов М.А. Импульсные технологии переработки нефти и нефтепродуктов / М.А. Промтов, А.С. Авсеев // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2007 – № 6 – С. 22–24.
191. Промтов М.А. Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив / М.А. Промтов // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2008 – № 2 – С. 6–8.
192. Профилометр form TALYSURF <https://www.geo-ndt.ru/catalog-25-izmeriteli-sherohovatosti-profilometri-profilemeri.htm>
193. Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. Издание десятое, испр. и дополн. / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой – СПб.: «Иван Федоров», 2003. – 240 с. ISBN 5-8194-0071-2
194. Распоряжение Правительства Российской Федерации о Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 года от 12 апреля 2020 года N 993-р. - Москва, 2020.
195. Ремонт форсунки common rail, delphi, denso и других аналогов своими руками. <https://avto-ritet.ru/drugoe/remont-forsunki-common-rail-delphi-denso-i-drugih-analogov-svoimi-rukami-vsemu-nuzhno-uchitsya.html>
196. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: учебник для ВУЗов. М.: Высшая школа, 2007. 400 с.

197. Руководство по техническому диагностированию при техническом обслуживании и ремонте тракторов сельскохозяйственных машин. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 252 с.
198. Сельское хозяйство в России. 2021: Стат.сб./Росстат – С 29 М., 2021. – 100 с.
199. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии //Физико-математическая литература, 2002 – 335 с.
200. Сергеев В.З. Восстановление плунжерных пар топливных насосов распределительного типа диффузионным хромотитанированием// дисс. к.т.н. Москва, 1985. – 220 с.
201. Сергеев И.В., Веретенникова И.И. Экономика организаций (предприятий): учебное пособие - 4-е изд., доп. и перераб. Юрайт. М.: - 2011. - 670 с. - ISBN 978-5-9916-1175-6
202. Серов А.В., Соколова В.М., Бурак П.И., Серов Н.В., Методы повышения прочности материалов в машиностроении: учебное пособие / А.В. Серов, В.М. Соколова, П.И. Бурак, Н.В. Серов, /., М.: ООО «Мегаполис» - 2021. – 165 с.
203. Сиднеев Ю.Г. Гальванические покрытия. – Ростов н/Д: Феникс, 200. – 256 с.
204. Скаков Ю.А. Рентгенография металлов. – М.: Машиностроение, 1977. – 127 с.
205. Скороходов А.Н., Левшин А.Г. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. — М.: БИБКОМ; ТРАНСЛОГ, 2017. — 478 с.: ил. — (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений.) ISBN 978-5-905563-66-9
206. Скороходов Д.М., Логачёв К.М. Влияние износа деталей распылителей форсунок на показатели автотракторных дизелей // Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвященная 155-летию РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева. Доклады ТСХА. 2021

207. Слинко Д.Б. Практика применения плазменно-порошковой наплавки при восстановлении изношенных деталей машин / Д. Б. Слинко, А. С. Дорохов, В. А. Денисов, В. П. Лялякин // Технология машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 32-37. – EDN VFRRXP
208. Смайлис В.И., Куров В.М., Новиков Л.А. Снижение токсичности и дымности дизелей карьерных автосамосвалов. В книге "Совершенствование технико-экономических показателей дизелей", ЦНИДИ, Л., 1981 г., с.157-163.
209. Справочный материал к совещанию о деятельности ФГБУ машиноиспытательных станций в 2022 году // МСХ РФ., М., 2023 – 22 с.
210. Станок для микрофрезерования/сверления POSALUX Microfor HP4-EDM/ <https://zao-novator.ru/oborudovanie-pod-zakaz/posalux-edm-hp4-microfor-edm>.
211. Степанов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М.Н. Степанов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.
212. Стукач О.В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством: учебное пособие / О.В. Стукач; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политех. ун-тета., 2011. – 163 с.
213. Сыркин В.Г. CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. – М.: Наука, 2000 – 496 с.: ил.
214. Сыркин В.Г. Газофазная металлизация через карбонилы. М: Металлургия, 1985 – 248 с.
215. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М. : Машиностроение, 1976. – 271 с.: ил.
216. Тополянский П.А. Ионно-плазменное напыление износостойких покрытий на инструмент / П. А. Тополянский // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций : Материалы 6-й Международной практической конференции-выставки, Санкт-Петербург, 13–16 апреля 2004 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное

учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2004. – С. 323-338.

217. Тришкин И.Б. Способы и технические средства снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей мобильных энергетических средств при работе в помещениях сельскохозяйственного назначения: дисс. д. тех. н.: 05.20.01 / Тришкин Иван Борисович: - Мичуринск, 2014. - 439 с.: 63 ил.

218. Указ президента РФ, об утверждении доктрины продовольственной безопасности РФ от 21.01.2020 года. №20.

219. Уманский Я.С. и др. Кристаллография, рентгенография, электронная микроскопия. – М.: Машиностроение, 1982. – 495 с.

220. Уманский Я.С. и др. Рентгенография металлов. М.: Машиностроение, 1969. – 484 с.

221. Устройство для нанесения износостойких покрытий на металлические изделия: Патент на полезную модель № 98193 U1 Российская Федерация, МПК С23С 16/18 / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.]; № 2010114349/02; заявл. 13.04.2010; опубл. 10.10.2010. EDN LQMXXM

222. Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки// Патент на полезную модель: RU 216021 U1, 2023.

223. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. - 17-е изд., испр. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. - 542 с.; ISBN 978-5-7038-4819-7

224. Филиппов М.А., Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении : учебное пособие : в 2 т. Т. I. Стали и чугуны / М. А. Филиппов, В. Р. Бараз, М. А. Гервасьев, М. М. Розенбаум. – 2-е изд., Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 232 с. ISBN 978-5-7996-0917-7

225. Хрущов М.М. Абразивное изнашивание [Текст] / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. - Москва: Наука, 1970. - 251 с.: ил.; 21 см.

226. Цирельман Н.М. Техническая термодинамика: Учебное пособие. — 2-е изд., доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2018 — 352 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978-5-8114-3063-5

227. Черепанов А.А., Зуев А.Ю., Гаврилова Л.Я. Физическая химия : Руководство для самостоятельной работы студентов : учеб.-метод. пособие / А. А. Черепанов, А. Ю. Зуев, Л. Я. Гаврилова, Д. С. Цветков, Т. В. Аксенова ; [под общ. ред. В. А. Черепанова] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. Федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 192 с. ISBN 978-5-7996-2111-7

228. Чечевицына Л.Н. Экономика фирмы: учебное пособие / Л.Н. Чечевицына, И.Н. Чуев. - Ростов н/Д.: Феникс, 2006. - 400 с. - (Высшее образование). - ISBN 5-222-07455-2

229. Чупятов Н.Н. Прогнозирование химического состава и свойства покрытий, получаемых термическим разложением $\text{Cr}(\text{CO})_6$ в газовой фазе / Н. Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2015. – № 5(69). – С. 22-26. – EDN VHDSKB

230. Чупятов Н.Н. Повышение долговечности деталей гидравлических систем с применением CVD-метода металлоорганических соединений: дис. ... д-ра техн. наук: / Российский государственный аграрный университет, М., 2018., 260 с.

231. Шаповалов С.Р. Исследование восстановления штифтовых распылителей форсунок тракторных двигателей методом борирования [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (05.20.03) / Моск. ин-т инженеров с.-х. производства им. В. П. Горячкина. - Москва : [б. и.], 1976.

232. Шиханова Ю.А., Монахов С.В. Экономика предприятия АПК: краткий курс лекций для студентов II курса специальности (направления подготовки) 380302 Менеджмент // ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2016. –73 с.

233. Шишурин С.А. повышение долговечности агрегатов сельскохозяйственной техники восстановлением прецизионных деталей

нанокomпозиционными гальвано-химическими покрытиями: дис. ... д-ра техн. наук: / Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, Саратов., 2019 – 419 с.

234. Щербаков Ю.В. Современные способы восстановления и упрочнения деталей: учебное пособие / Ю. В. Щербаков, А. М. Кашфуллин; М-во с.-х. РФ, федеральное гос. бюджетное образов. учреждение высшего образования «Пермский гос. аграрно-технолог. ун-т. им. акад. Д.Н. Прянишникова». – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2018. – 191 с. ISBN 978-5-94279-393-7

235. Эйдис А.Л. Обоснование нормативного срока службы машины на стадии ее создания / А. Л. Эйдис, Е. П. Парлюк, Н. А. Тимошенко // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 2. – С. 54-58. – EDN THALVB

236. Юдин В.М. Восстановление деталей гальваническими покрытиями / В. М. Юдин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ф. Х. Бурумкулова, Саранск, 24–25 мая 2016 года / Институт механики и энергетики; Ответственный за выпуск: Столяров А. В.. – Саранск: ОАО "Типография "Рузаевский печатник", 2016. – С. 87-91.

237. Юдин В.М. Обеспечение надёжности дизельной топливной аппаратуры / В. М. Юдин, А. А. Мылов, А. А. Соколов // Труды ГОСНИТИ. – 2008. – Т. 102. – С. 59-60. – EDN SZTMPF

238. Юрьев С.Ф. Деформация стали при химико-термической обработке: Цементация и азотирование / Под ред. акад. Н. Т. Гудцова. - Москва; Ленинград: Машгиз., 1950. – 307.

239. Юшков Ю.Г. Электронно-лучевое нанесение многофункциональных диэлектрических покрытий форвакуумными плазменными источниками : диссертация ... доктора технических наук : 01.04.04. - Томск, 2021. - 321 с. : ил.

240. Crowe C., Sommerfeld M. and Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press, 1998. 471 p.

241. Deutz-Fahr <https://istk-deutz.ru/zapchasti/>
242. Dieseleinspritzpumpen - Verteilereinspritzpumpe - Axialkolben (VE) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/diesel/pumpcn/verteilcrpumpe.html>
243. Diezel-Einspritzausrustung // Technische Unterrichtung / Robert Bosch. - Stuttgart, 2001.-S. 12.
244. Diezeleinspritztechnik im Uberblick // Technische Unterrichtung / Robert Bosch. – Stuttgart, 1989. – S. 20-21.
245. Douard A., Maury F., Jorcin J.B. Reactivity of $\text{Cr}(\text{CO})_6$ in atmospheric pressure CVD processes for the growth of various metallurgical coatings. Reviews on advanced materials science. 2007;15(1):24-32.
246. Hill, T.L. Thermodynamics of Small System / T.L. Hill. – Dover Publications, Inc., 2002. – 408 p.
247. Hummel W., Mompean J. and other. Chemical thermodynamics of compounds and complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zr with selected organic ligands. Boston: Elsevier Science, 2005. 1133 p.
248. John Deere <https://www.deere.ru/>
249. Kodas T.T., Hampden-Smith M.J. The chemistry of Metal CVD. Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo.: VCH. 1994.
250. Projekt: Abscheidung neuartiger Hartstoffschichtsysteme durch Zersetzung von metallorganischen Verbindungen. 13N5791. BMFT. (BRD). 1990-1993. K. Keller. F. Koch, B.I. Petrov, G.V. Almazov // Bericht. 1993. 48s. VST. Schopfheim.
251. The Blue Book, region EMEA для внутреннего пользования Volvo Construction Equipment. 2019. – 560 с.
252. Zhang C., Du Y., Peng Y. and other Thermodynamic modeling of the C–CO–Mo and C–Mo–N ternary systems. Journal of Phase Equilibria and Diffusion. 2016:37(4):423-437

ПРИЛОЖЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 216021

**Устройство для формирования износостойкого
покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой
внутренней поверхности корпуса распылителя
форсунки**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Ерохин Михаил Никитьевич (RU), Казанцев Сергей Павлович (RU), Чунятов Николай Николаевич (RU), Изнаткин Иван Юрьевич (RU), Скороходов Дмитрий Михайлович (RU), Логачёв Константин Михайлович (RU)*

Заявка № 2022120149

Приоритет полезной модели 22 июля 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 13 января 2023 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 22 июля 2032 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68680077614e4070294e6bd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.07.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**216 021** (13) **U1**(51) МПК
C23C 16/32 (2006.01)
C23C 16/54 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
C23C 16/32 (2022.08); C23C 16/54 (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2022120149, 22.07.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
22.07.2022Дата регистрации:
13.01.2023Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 22.07.2022

(45) Опубликовано: 13.01.2023 Бюл. № 2

Адрес для переписки:
127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49, РГАУ-
МСХА имени К.А. Тимирязева, Управление
научной и инновационной деятельности

(72) Автор(ы):

Ерохин Михаил Никитьевич (RU),
Казанцев Сергей Павлович (RU),
Чупятов Николай Николаевич (RU),
Игнаткин Иван Юрьевич (RU),
Скорородов Дмитрий Михайлович (RU),
Логачёв Константин Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Российский государственный
аграрный университет - МСХА имени К.А.
Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА
имени К.А. Тимирязева) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 98193 U1, 10.10.2010. RU 2456373
C1, 20.07.2012. RU 2394117 C2, 10.07.2010. US
20020144657 A1, 10.10.2002. WO 2008062269 A1,
29.05.2008.

(54) Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки

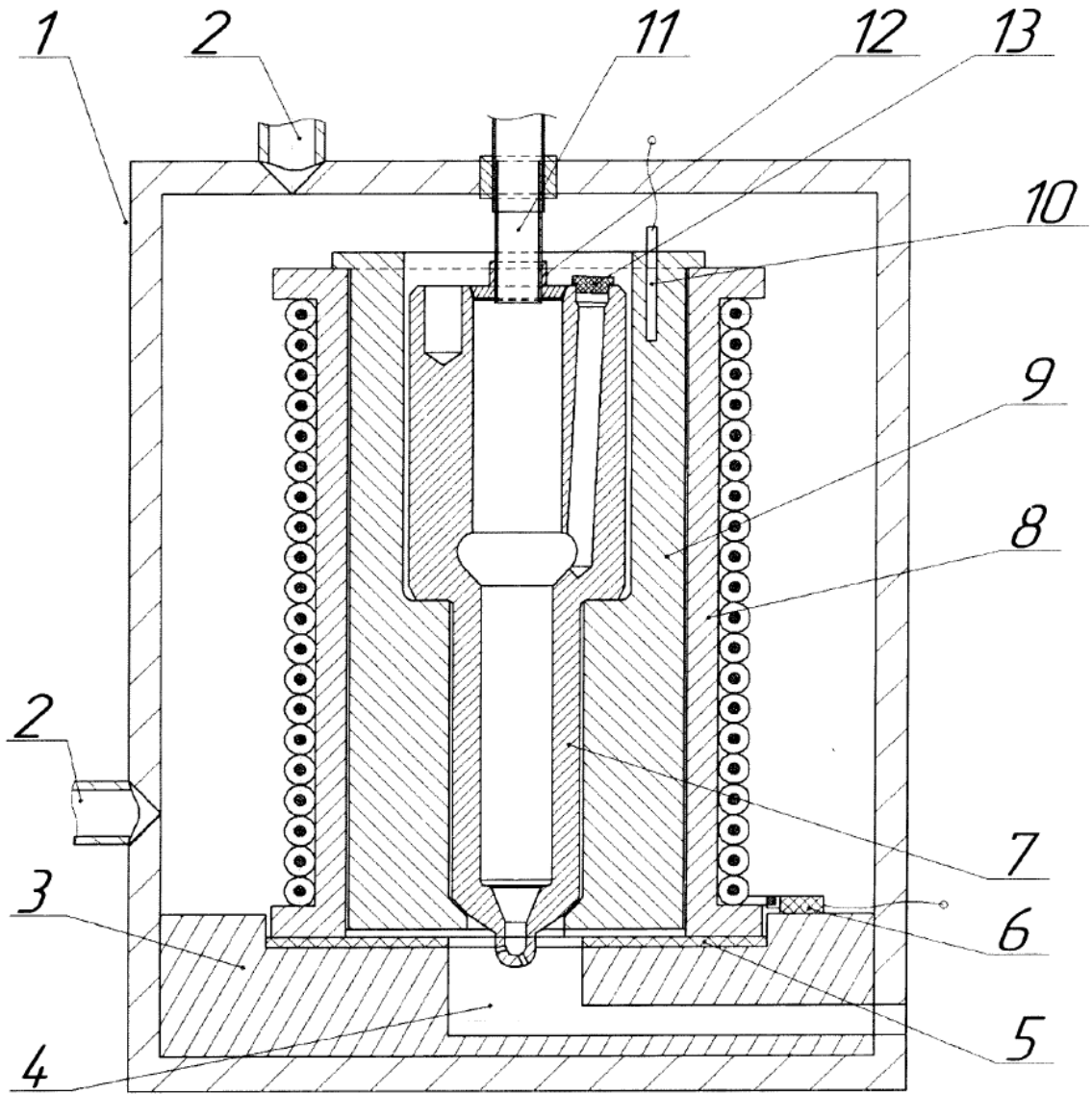
(57) Реферат:

Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки относится к области сельскохозяйственного машиностроения и автомобильной промышленности. Упомянутое устройство содержит реактор, выполненный в виде прямоугольного параллелепипеда с возможностью подвода внутрь него реакционной газовой смеси, состоящей из паров гексакарбонила хрома и инертного газа, и отвода продуктов реакции. В реакторе на нижней стенке установлен монтажный стол, имеющий установочную площадку и газоотвод, сопрягаемый с газоотводом упомянутого

реактора. На упомянутой установочной площадке монтажного стола установлен индуктор, изготовленный с возможностью размещения в нем корпуса распылителя форсунки и состоящий из нагревателя, содержащего втулку, и термопары, установленной в отверстии корпуса втулки. В верхней стенке реактора установлена телескопическая трубка с возможностью центровки относительно восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки для подвода внутрь него упомянутой реакционной газовой смеси. Обеспечивается возможность формирования покрытия из карбидов хрома. 2 ил.

RU 216021 U1

RU 216021 U1



Фиг.1

RU 216021 U1

RU 216021 U1

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ
ИННОВАЦИЯМ

ДИПЛОМ

победителя программы «УМНИК»

Логачёв

Константи́н Михайлович

2022



Генеральный директор

С.Г. Поляков

A blue ink signature of S.G. Polyakov, written in a cursive style, positioned above a horizontal line.

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор по науке
и инновационному развитию
ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА
имени К.А. Тимирязева


А.В. Журавлев
2023 г.



“УТВЕРЖДАЮ”

Председатель СПК «Мурава»
МО ГО Шаховская в МО


С.Ю. Новожилов
2023 г.



А К Т

о постановке на эксплуатационные испытания топливных форсунок
автотракторных дизелей ФД-22 с распылителями, восстановленными
карбидохромовыми покрытиями

Мы, нижеподписавшиеся, председатель сельскохозяйственного
производственного кооператива СПК «Мурава» С.Ю. Новожилов и механик
А.С. Глазунов, с одной стороны, и аспирант Российского государственного
аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева К.М. Логачёв, с
другой стороны, составили настоящий акт о том, что 01 марта 2023 года была
произведена установка топливных форсунок автотракторных дизелей ФД-22 с
распылителями на двигатели: Д-240 трактора МТЗ-80, Д-243 трактора МТЗ
82.1, ЯМЗ-236М2 на трактор ХТЗ Т-150К с целью проведения
эксплуатационных испытаний. Всего к испытаниям было подвергнуто 22
распылителя.

Трактор	Номер двигателя	Наработка двигателя на момент установки форсунок, мото-ч	Форсунка
МТЗ-80	860802	3521	39.1112010-05
МТЗ-80	253982	4834	39.1112010-05
МТЗ 82.1	138377	1505	171.1112010-01
МТЗ 82.1	148143	2362	171.1112010-01
Т-150К	В0447324	4319	261.1112010-11

Председатель

Механик

Аспирант



С.Ю. Новожилов

А.С. Глазунов

К.М. Логачёв

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор по науке
и инновационному развитию
ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА
имени К.А. Тимирязева


А.В. Журавлев
“05” июля 2023 г.



“УТВЕРЖДАЮ”

Председатель СПК «Мурава»
МО ГО Шаховская в МО


С.Ю. Новожилов
“05” июля 2023 г.



А К Т

внедрения результатов научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, в лице представителя СПК «Мурава» председателя Новожилова С.Ю., с одной стороны, и представителей ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева д.т.н., профессора Казанцева С.П. и аспиранта Логачёва К.М. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что по завершению проведения эксплуатационных испытаний результаты научно-исследовательской работы “Разработка технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома” будут внедрены на предприятии путём реализации технологического процесса восстановления распылителей форсунок.

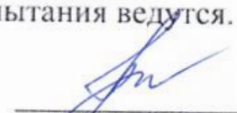
Результатом законченной научно-исследовательской работы является: “Технологический процесс восстановления и упрочнения стальных деталей карбидохромовыми покрытиями”. Внедряемая научно-исследовательская работа содержит патент RU 216021 U1.

Номенклатура восстанавливаемых и упрочняемых деталей – распылители форсунок автотракторных дизелей.

Ожидаемый чистый доход от внедрения данной технологии за 5 лет 52,5 млн. рублей. Внутренняя норма доходности от реализации технологии 44,57%. Срок окупаемости 2,1 года. Нарботка восстановленных и упрочнённых распылителей не менее 10 000 мото-ч.

Разработанные технологические процессы восстановления и упрочнения распылителей форсунок автотракторных дизелей карбидохромовыми покрытиями приняты к внедрению. Эксплуатационные испытания ведутся. Отказы не выявлены.


Председатель СПК «Мурава»


С.Ю. Новожилов

Руководитель НИР: д.т.н., профессор


С.П. Казанцев

Ответственный исполнитель


К.М. Логачёв