

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Казанцев Сергей Павлович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой сопротивления
материалов и деталей машин ФГБОУ
ВО РГАУ-
МСХА имени К. А. Тимирязева

Официальные оппоненты: **Юдин Владимир Михайлович**
доктор технических наук, профессор кафедры
МТ-13 «Технологии обработки материалов»
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана»
(национальный исследовательский университет)

Симохин Сергей Петрович
кандидат технических наук, доцент кафедры
общетехнических дисциплин и физики ФГБОУ
ВО «Брянский государственный инженерно-
технологический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Рязанский государственный
агротехнологический университет имени
П. А. Костычева»

Защита диссертации состоится 23 ноября 2023 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел./факс: 8 (499) 976-21-84.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Николай Николаевич Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

Надёжность топливной аппаратуры (ТА) дизелей лимитируется износостойкостью прецизионных деталей. Согласно проведённому мониторингу неисправностей форсунок автотракторных дизелей не менее 66% отказов приходится на распылитель, в котором изнашиваются торцы иглы и корпуса, направляющие поверхности, запорный конус и распыляющие отверстия. Основная причина низкой износо- и коррозионной стойкости рабочих поверхностей прецизионных деталей – загрязнённость дизельного топлива.

Высокую надёжность распылителей форсунок можно обеспечить с помощью совершенствования системы очистки топлива и значительного повышения физико-механических свойств рабочих поверхностей деталей.

Первый путь ограничивается качеством применяемых фильтров очистки топлива. Фильтры тонкой очистки способны задерживать загрязняющие вещества размером до 3-х мкм и имеют степень очистки 85...98%.

Второй путь, которому посвящена данная работа, должен обеспечивать безыносную работу прецизионных деталей в условиях повышенного содержания абразива в топливе. Это достигается за счёт применения упрочняющих покрытий, микротвёрдость которых значительно превышает микротвёрдость абразивных частиц.

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

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

Вопросам создания новых способов повышения надёжности сельскохозяйственной техники, развития технологии ремонта, снижения токсичности отработанных газов дизельных двигателей посвящены работы: Балабанова В.И., Батищева А.Н., Богачёва А.Б., Борисова Г.А., Борычева С.Н., 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., Тришкина И.Б., Успенского И.А., Черноиванова В.И., Чупятова Н.Н., Шаповалова С.Р., Юдина В.М., и других учёных.

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, параллельно осаждению покрытия, происходит низкий отпуск деталей, что приводит к изменению их физико-механических свойств. Поэтому исследования в области разработки технологии по снижению температуры процесса осаждения покрытий на стальные поверхности деталей машин являются актуальными и позволяют решить проблему повышения надёжности распылителей форсунок дизельных двигателей с минимальными затратами.

Цель исследования. Разработка технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома при температуре ниже 200 °С.

Объект исследования. Осаждение карбидохромового покрытия на стальные детали распылителей форсунок автотракторных дизелей.

Предмет исследования. Количественные и качественные характеристики карбидохромовых покрытий на труднодоступных рабочих поверхностях распылителей форсунок автотракторных дизелей.

Методы исследования. В основу теоретических исследований положены законы термодинамики, 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.

Научная новизна. Теоретически доказана возможность осаждения карбидохромового покрытия CVD-методом на труднодоступные внутренние поверхности прецизионных деталей ТА при температуре до 200°С. Установлена критическая толщина карбидохромового покрытия, обеспечивающая работоспособность восстановленного соединения «игла – корпус распылителя».

Обоснованность и достоверность. Подтверждается использованием физико-математических законов, теоретических основ теории абразивного разрушения металлических покрытий, применением современных методик и измерительных приборов, а также использованием математической статистики при обработке результатов экспериментальных исследований.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработана технология восстановления распылителей форсунок с помощью термического разложения металлоорганического соединения гексакарбонила хрома при температуре ниже низкого отпуска деталей 200 °С, приводящей к исключению их деформаций и повторной закалки;
- разработана CVD-установка для формирования карбидохромового покрытия на внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки (патент РФ на полезную модель RU 216021 U1);
- упрочнение обеих деталей прецизионного соединения «игла-корпус распылителя» обеспечивает повышение ресурса в 2,5 и более раз.

Реализация результатов исследований. Разработанные технологические процессы восстановления и упрочнения распылителей форсунок автотракторных дизелей карбидохромовыми покрытиями приняты к внедрению. Эксплуатационные испытания ведутся. Отказы не выявлены.

Апробация работы. 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, посвящённая 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

- термодинамические условия осаждения карбидохромового покрытия при температуре CVD-метода ниже 200 °С;
- методика определения критической и оптимальной толщины карбидохромового покрытия на стальных деталях распылителя форсунки;
- режимы CVD-метода, обеспечивающие низкотемпературное осаждение карбидов хрома при максимальной микротвёрдости и скорости роста;
- физико-механические характеристики упрочняющего покрытия;
- результаты лабораторных и эксплуатационных испытаний восстановленных распылителей форсунок;
- технико-экономическая оценка результатов исследований.

Публикации. 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 диссертации. Диссертационная работа изложена на 216 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 63 рисунка, 22 таблицы, заключения, списка литературы, включающей 252 наименования, в том числе 12 – на иностранном языке и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дана общая характеристика проблемы, изложены цель исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования, основные положения, выносимые на защиту.

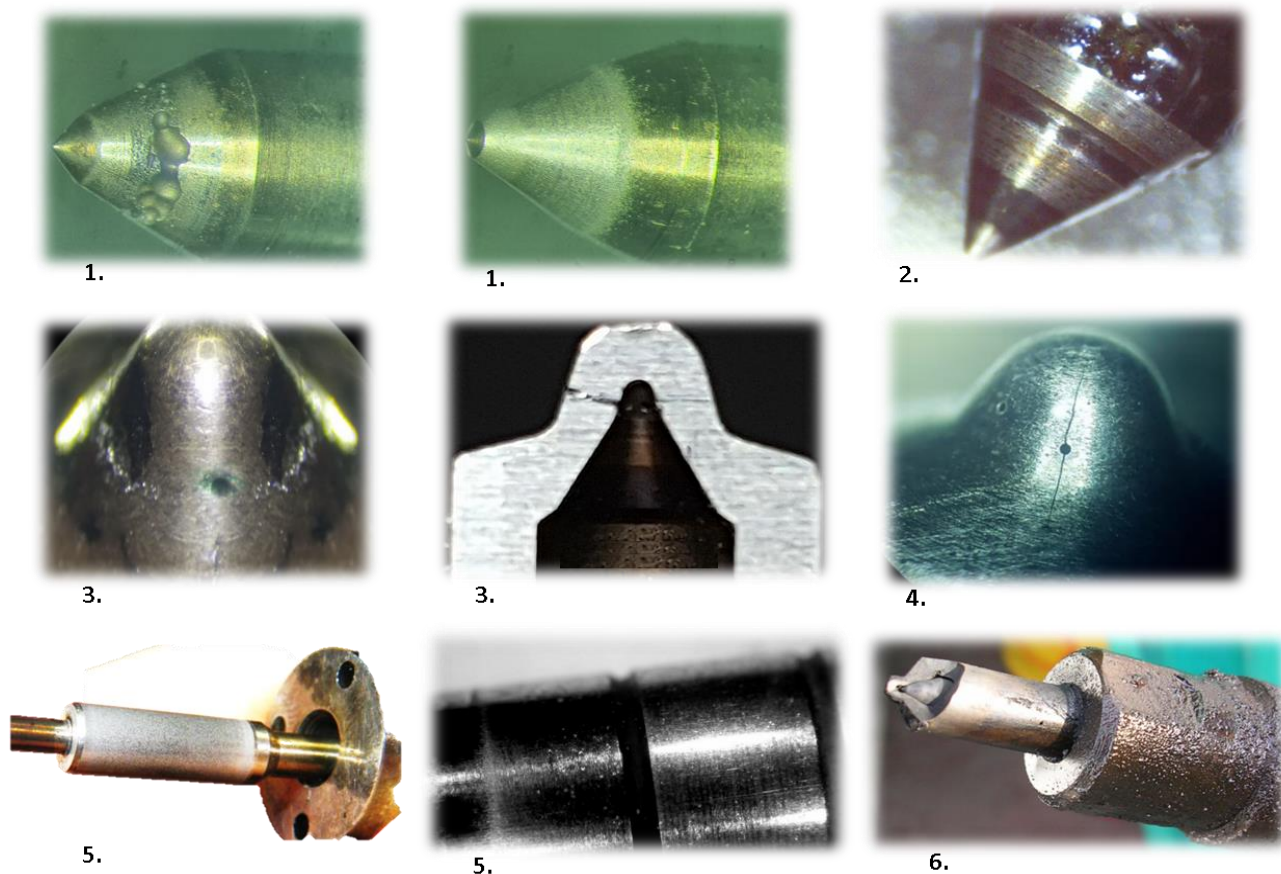
В первой главе изложены результаты анализа ранее выполненных исследований по вопросам восстановления деталей ТА и способов упрочнения поверхностей. Рассмотрены вопросы производства, эксплуатации и отказов ТА. Приведена номенклатура распылителей форсунок, проведён анализ их износов и рассмотрены пути решения повышения надёжности. Сделаны основные выводы, определены задачи и цели исследования.

Большинство отечественных сельскохозяйственных машин оснащаются дизельными двигателями, которые комплектуются механической топливной системой. Наиболее популярные форсунки ФД-22, ФД-11, ФД-111, ФШ-62005 и другие. Они имеют одинаковый принцип работы, но отличаются размерами. Наряду с этим имеются отличия и у распылителей в части размеров и количества распыляющих отверстий.

Распылители для механической топливной системы выпускаются на Алтайском заводе прецизионных изделий и Ярославском заводе дизельной аппаратуры. Устанавливаются на дизеля СМД, ТМЗ, Д240...260, ЯМЗ и другие. Средняя наработка распылителей находится в интервале в 500...4000 мото-ч.

Иглы распылителей изготавливаются из инструментальных сталей Р18, Р6М5 и в редких случаях 9ХС. Максимальная поверхностная твёрдость сталей 63...65 HRC. Микротвёрдость – 7850 МПа. Корпус распылителя изготавливают из конструкционных легированных высококачественных сталей 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА и 40ХН2МА. Твёрдость поверхности стали после упрочнения составляет 60...62 HRC. Микротвёрдость корпуса распылителя – 7350 МПа. Для сохранения физико-механических свойств иглы и корпуса распылителя форсунки и исключения их повторной закалки температура осаждения карбидохромового покрытия не должна превышать уровня низкого отпуска деталей 180...200°С.

Основная причина износа прецизионных пар в топливной системе связана с качеством топлива, так как оно загрязняется при транспортировке от нефтеперерабатывающего завода до топливного бака машины с 0,0005 до 0,063%, или в 126 раз. Несмотря на это, загрязнение топлива абразивными частицами осуществляется при эксплуатации техники путём проникновения пыли в топливный бак через сапун. При пахоте концентрация абразивных частиц в топливе доходит до 30 г/т. Взаимодействие абразивной частицы с поверхностью трения прецизионных деталей вызывает абразивное изнашивание. Параллельно к этому в топливе находятся химически активные вещества (вода, воздух, растворённые органические соединения и другое), которые вызывают коррозию металла. Следовательно, распылители форсунок подвержены внезапным и постепенным отказам. Общий вид изношенных распылителей представлен на рисунке 1.



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.

Рисунок 1 – Внешний вид и дефекты изношенных деталей распылителей.

Места износа иглы и корпуса распылителя (рисунок 2) следующие: внешние поверхности – торец иглы *1* и торец корпуса распылителя *2* и внутренние поверхности – направляющая *A*, запирающий конус *B* и распыляющие отверстия *B*. Торец иглы *1* истирается в результате многоцикловых динамических нагрузок, воспринимаемых от пружины форсунки и возникающих при завершении подачи топлива в ЦПГ. Торец корпуса форсунки *2* не изнашивается, но влияет на износ направляющей *A* и запорного конуса *B* распылителя. В результате изнашивания направляющей *A* снижается гидроплотность, которая влияет на качество впрыска и расход топлива, а также мощность двигателя. При износе запорного конуса *B* проседает игла и ухудшается герметичность сопряжения. Значительный износ запорной части приводит к прорыву газов из ЦПГ вовнутрь распылителя, так как с увеличением зазора направляющей *A* увеличивается угол биения иглы в запорной части *B* распылителя, а, следовательно, с каждым циклом подачи топлива в ЦПГ игла своим конусом разбивает запирающий конус корпуса распылителя.

Распыляющие отверстия *B* подвержены кавитации и гидроабразивному износу. Наиболее эффективным решением повышения надёжности распылителей

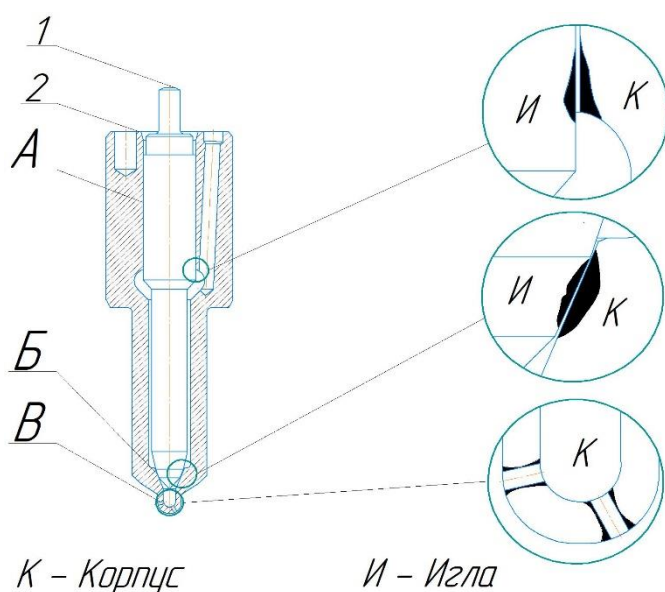


Рисунок 2 – Дефекты (износ) иглы и корпуса распылителя.

является разработка упрочняющих технологий как для восстановления изношенных, так и для выпуска новых деталей.

На основании этого упрочнение рабочих поверхностей деталей позволит компенсировать несовершенство имеющихся в настоящее время уплотнений, соединений и систем фильтрации.

Для обеспечения безотказной работы деталей при наличии в зоне контакта кварцевого абразива микротвёрдость прецизионной поверхности должна составлять не менее 9 ГПа, а при наличии оксида алюминия не менее 16,8 ГПа.

Наиболее перспективным способом восстановления геометрических размеров деталей распылителей форсунок является низкотемпературная технология получения карбидохромовых покрытий с помощью парофазной химической металлизации (CVD – метод) в вакууме. Данный способ позволяет исключить коробление деталей.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать следующие требования к разрабатываемой технологии:

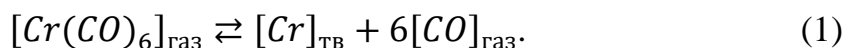
1. Низкотемпературное осаждение карбидохромового покрытия, исключаяющее коробление и проведение повторной закалки деталей;
2. Получение упрочняющего покрытия с микротвёрдостью не менее 16,8 ГПа;
3. Возможность нанесения покрытия на труднодоступные поверхности деталей, в том числе и на распыляющие отверстия 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 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.

Во второй главе изложены теоретические предпосылки восстановления и упрочнения распылителей форсунок карбидохромовым покрытием, полученных при разложении паров гексакарбонила хрома:



Определение термодинамических условий осаждения покрытия. Впервые предложено использовать гипотезу двух приближений для определения минимальной температуры термораспада гексакарбонила хрома с последующей химической парофазной металлизацией в условиях вакуума.

Теоретический расчёт по первому приближению определяет возможность протекания химических реакций и их направление, осуществляемых в реакционной камере CVD-установки, а по второму приближению определяет минимальную температуру начала термораспада гексакарбонила с последующим образованием карбида в зависимости от давления вакуума в реакторе установки.

Оценить возможность протекания термодинамических реакций и определить температуру начала их осуществления, в первом приближении, возможно методом изменения изобарно-изотермического потенциала:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0, \quad (2)$$

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:

$$T = \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0}. \quad (3)$$

Согласно следствию закона Гесса, тепловой эффект химической реакции равен разности образования сумм теплового эффекта $\sum H_{298}^0$ и $\sum S_{298}^0$ продуктов и исходных веществ:

$$\Delta H_{298}^0 = \sum H_{298, \text{веществ}}^0 \text{ конечных} - \sum H_{298, \text{веществ}}^0 \text{ начальных}, \quad (4)$$

$$\Delta S_{298}^0 = \sum S_{298, \text{веществ}}^0 \text{ конечных} - \sum S_{298, \text{веществ}}^0 \text{ начальных}. \quad (5)$$

Согласно первому закону термодинамики и второму равенству Клаузиуса, значения внутренней энергии, энтальпии, энергии Гельмгольца и энергии Гиббса зависят от температуры и давления, установленных в термодинамической системе, что подтверждается теоремой Коши и 4-ым уравнением Максвелла:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T. \quad (6)$$

Отсюда зависимость свободной энергии Гиббса при изменении давления и постоянной температуре ($T=const$):

$$dG(T, P) = dG(T) + \int_{P_c}^{P_{изм}} V dP, \quad (7)$$

где $dG(T)$ – свободная энергия Гиббса при установившемся давлении, кДж; P_c и $P_{изм}$ – давление в реакторе, соответственно стандартное и установившееся, при $P_c \neq P_{изм}$, Па; V – объём реакционной среды в реакторе, м³.

Используя уравнение идеального газа $PV = RT$ или $V = \frac{RT}{P}$, интеграл функции примет вид:

$$\int_{P_c}^{P_{изм}} V dP = RT \int_{P_c}^{P_{изм}} \frac{dP}{P} = RT \ln \frac{P_{изм}}{P_c} = RT \ln \tilde{P}, \quad (8)$$

тогда

$$dG(T, P) = dG(T) + RT \ln \tilde{P}, \quad (9)$$

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

Следовательно, с изменением давления вакуума изменяется энтропия химических веществ, находящихся в реакционной камере, тогда:

$$dG(T, P) = \Delta H(T) - T \Delta S(T) + RT \ln \tilde{P}. \quad (10)$$

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

$$T = \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0 - R \ln \tilde{P}} - \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0}. \quad (11)$$

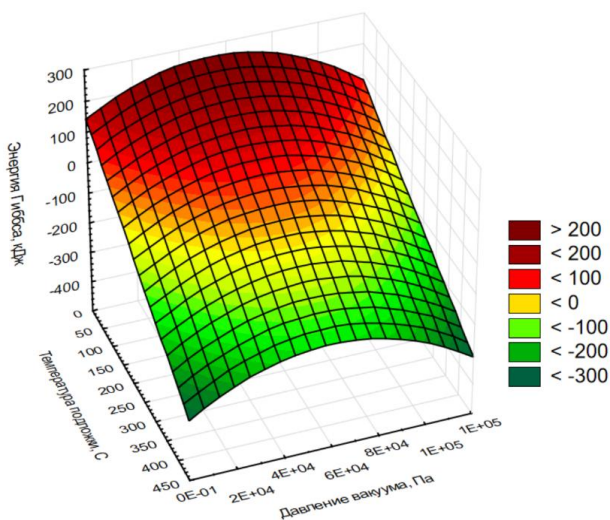


Рисунок 3 – Функция отклика изменения энергии Гиббса от давления вакуума и температуры подложки

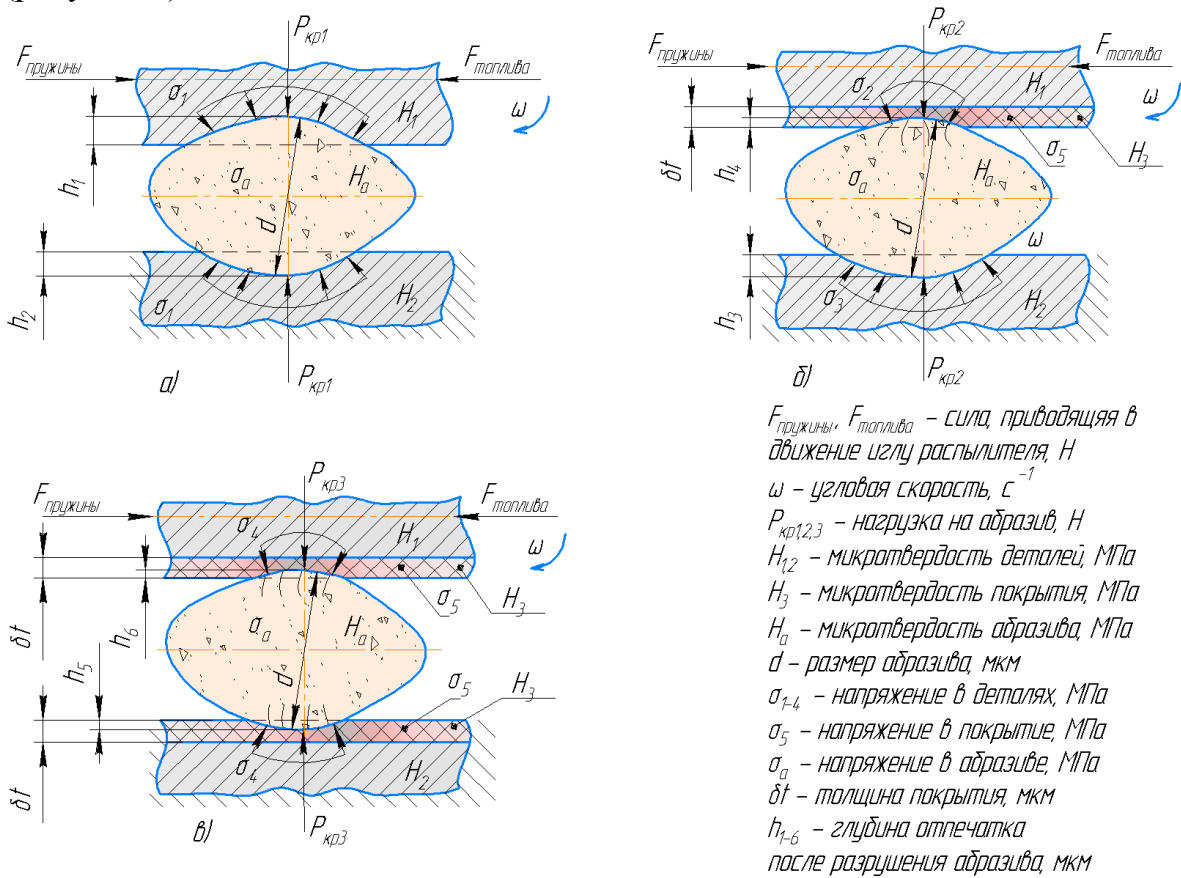
реакций. Увеличение давления вакуума до 0,001 Па приводит к снижению температуры начала термического разложения гексакарбонила хрома с 191 °С до 123 °С.

Установлено уравнение регрессии (12) и построена функция отклика (рисунок 3) зависимости энергии Гиббса от температуры подложки и давления вакуума в реакторе:

$$G(T, P) = 141,59 - 0,98T + 0,004P - 7,94 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 9,35 \cdot 10^{-7} \cdot TP - 4,1 \cdot 10^{-8} \cdot P^2. \quad (12)$$

Таким образом, с повышением давления вакуума снижается температура протекания химических реакций из-за увеличения энтропии веществ. В результате затрачивается меньшее количество тепловой энергии на осуществление термодинамических

Определение критической и оптимальной толщины карбидохромового покрытия на деталях распылителя. Разработана модель контактно-абразивного нагружения направляющей распылителя форсунки (рисунок 4).



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 4 – Схема нагружения в соединении «деталь-абразив-деталь».

Модель учитывает три варианта комплектации распылителей деталями. Вариант (а) предусматривает использование серийных распылителей без упрочняющего покрытия. Характер износа иглы и корпуса схож, так как 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 микротвёрдостью H_3 . Вариант (в) предусматривает комплектацию, в которой обе детали содержат упрочняющий слой H_3 .

Установлено, что для увеличения надёжности форсунок оптимально наносить износостойкое покрытие на обе детали распылителя, так как это приводит к снижению удельной нагрузки на поверхность прецизионной пары при разрушении абразива и способствует увеличению наработки сопряжения.

Впервые рассмотрен вопрос по определению удельной критической толщины покрытия, в зависимости от его микротвёрдости и диаметра абразивной частицы, которая определяется следующим уравнением:

$$h_{кр} = f(H_M, R) = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot R \cdot P_a \cdot \left(\frac{R[\sigma_a]}{H_M} \right)^3 \cdot (1 - \mu_2)}{4 \cdot E_{пр}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 P_a (1 - \mu_2^2) R}{4 E_{пр}}} \quad (13)$$

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

$$h_{кр} = f(H_M, R) = \frac{R[\sigma_a]}{H_M \cdot \sqrt[3]{(1 + \mu_2)}}, \quad (14)$$

где f – функция определения критической толщины покрытия от микротвёрдости и диаметра абразива; H_M – микротвёрдость покрытия, МПа; R – радиус абразивной частицы, мм; P_a – критическая нагрузка к моменту разрушения абразива, Н; $[\sigma_a]$ – предел прочности абразивной частицы, МПа; μ_2 – коэффициент Пуассона покрытия; $E_{пр}$ – приведённый модуль упругости, МПа.

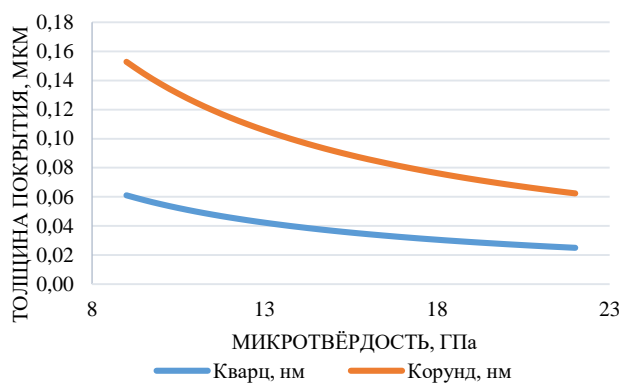


Рисунок 5 – Зависимость изменения критической толщины от микротвёрдости покрытия.

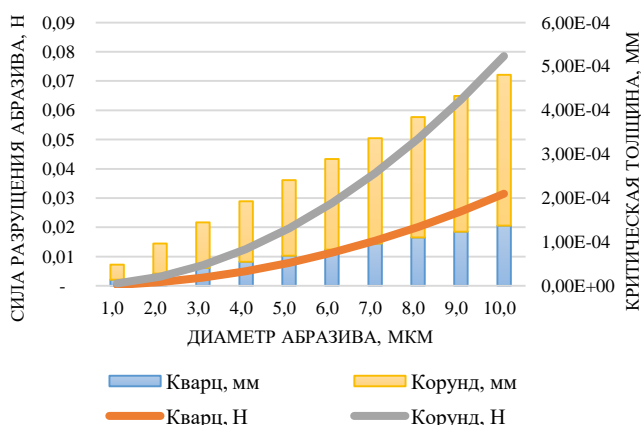


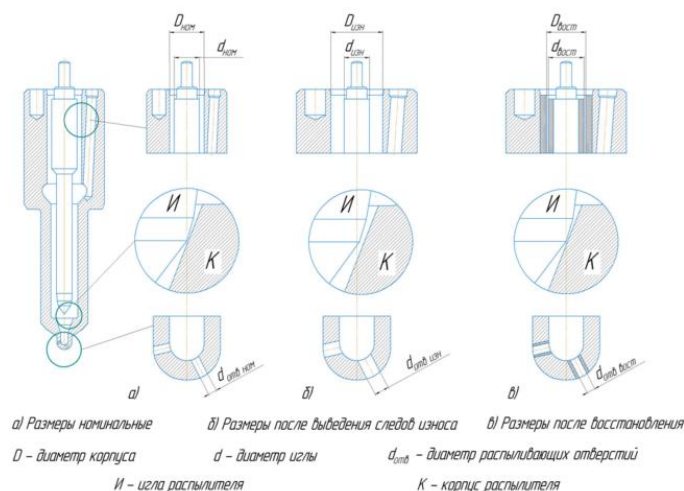
Рисунок 6 – Зависимость изменения силы разрушения абразивной частицы и критической толщины карбидохромового покрытия от диаметра абразива.

При планировании ресурса деталей, эксплуатируемых в условиях гидроабразивного изнашивания, лимитирующим фактором является микротвёрдость и толщина осаждённого упрочняющего слоя. Толщина покрытия по установленной формуле (14) с увеличением микротвёрдости уменьшается по экспоненциальному закону и на оборот (рисунок 5).

В то же время при постоянной микротвёрдости покрытия критическая толщина изменяется линейно относительно размера абразивной частицы. С увеличением диаметра абразива требуется большая сила на его разрушение, которая описывается параболическим законом. На рисунке 6 представлен график зависимостей силы разрушения абразивных частиц и критической толщины покрытия при его микротвёрдости 16,8 ГПа.

Несущая способность карбидохромового покрытия при микротвёрдости 16,8 ГПа и диаметре абразивной частицы корунда 3 мкм обеспечивается при толщине не менее 0,082 мкм.

Определение необходимой толщины покрытия для обеспечения восстановления ремфнда распылителей в полном объёме. Максимальные износы направляющей распылителя – 70 мкм, запорного конуса – 20 мкм, а распыляющих отверстий – 78 мкм (рисунок 7). При восстановлении



а – серийный; б – изношенный;
в – восстановленный.

Рисунок 7 – Схема геометрических размеров деталей распылителя.

восстановления деталей сопровождаются их короблением в результате высокотемпературного воздействия. Одной из целей данной работы является формирование покрытия без прогиба деталей путём применения низкотемпературного режима осаждения карбида хрома. Следовательно, деформация деталей будет отсутствовать. Следовательно, толщина карбидохромового покрытия на каждую деталь распылителя в направляющей при условии одинаковой толщины для гарантированного восстановления ремфнда в полном объёме будет определяться следующим уравнением:

$$h = \frac{(D_{н.и} - d_{и.и}) + (d_{и.к} - D_{н.к})}{2} + P_M + P_{п.п} + P_{пш} - P_d - \frac{1}{2}D + \sum Rz_{i_d} + \sum Rz_{i_п}, \quad (15)$$

где $D_{н.и}$, $D_{н.к}$ – номинальный диаметр иглы и корпуса распылителя, мм; $d_{и.и}$, $d_{и.к}$ – диаметр после выведения следов износа у иглы и корпуса распылителя, мм; P_M – припуск на механическую обработку, мм; $P_{п.п}$ – припуск на полировку при подготовке поверхности к осаждению покрытия, мм; $P_{пш}$ – запас на припуск для перешлифовки в другие ремонтные группы, мм; P_d – припуск на доводку и комплектовку, мм; D – конструкторский допуск, зазор между иглой и корпусом распылителя, мм; $\sum Rz_{i_d}$ – высота микронеровностей, полученных при подготовке стальной поверхности к осаждению покрытия, мм; $\sum Rz_{i_п}$ – высота микронеровностей на полученном покрытии, мм.

Толщина карбидохромового покрытия в распыляющих отверстиях будет определяться уравнением:

$$h_{\mu f} = \frac{(d_{изн} - d_{ном})}{2} + P_M + P_п + \sum Rz_{i_d} + \sum Rz_{i_п}, \quad (16)$$

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

направляющей распылителя форсунки необходимо обеспечить зазор между иглой и корпусом 2...4 мкм. Припуск на механическую обработку с учётом технологичности, компенсации износа и дефектов – 50 мкм на диаметр, шероховатость поверхности Ra0,32 и Rz2,6 мкм. Для исключения повторного осаждения и возможности перешлифовки деталей в ремонтные группы дополнительный припуск на толщину покрытия должен быть не менее 5 мкм на диаметр.

Существующие способы

Таким образом, для обеспечения восстановления ремфонда деталей распылителя в полном объёме толщина карбидохромового покрытия по предложенным расчётным формулам должна составлять: по направляющим поверхностям 45,625 мкм; в распыляющих отверстиях 139,45 мкм.

В третьей главе изложены программа, общая и частные методики проведения экспериментальных исследований, описание экспериментальных установок и средств измерения.

Нанесение покрытия на рабочие поверхности иглы распылителя осуществляли с помощью вращательного способа, а на внутренние труднодоступные поверхности корпуса распылителя форсунки с помощью протяжки реакционной среды (Патент RU 216021 U1).

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. Размеры диаметра от 3,0 мм запирающего конуса корпуса распылителя и от диаметра 2,0 мм запирающего конуса иглы до уплотняющего торца определялись на приборах, оснащённых индикаторными головками часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Шероховатость поверхностей деталей фиксировалась с помощью профилографа-профилометра модели 201 “Калибр” ГОСТ 19300. Шероховатость определяли в соответствии с ГОСТ 2789 по Ra и Rz.

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.

Скорость роста покрытий определялась по росту массы. Взвешивание выполнялось на лабораторных весах ВМ-II с точностью до 0,1мг. Повторность замеров принималась не менее 3-х кратной.

Измерение размеров определялось по разнице средних диаметров образцов до и после осаждения покрытия с учетом 3-х кратной повторности. Толщина карбидохромового покрытия замерялась на шлифах с помощью оптической системы инвертированного металлографического микроскопа GX53.

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

Определение микротвёрдостей покрытия и подложки проводилось твердомером DuraScan 20 G5 путём вдавливания алмазной пирамидки с углом при вершине 136° под нагрузкой 0,2Н и 1Н в течение 15 с.

Измерение шероховатости поверхностей деталей проводилось с помощью профилометров фирмы Taylor Hobson. Точность измерительного оборудования 0,05 мкм.

Коробление деталей измеряли на призмах-ножах с использованием индикаторной головки 1 МИГ ГОСТ 1696 с ценой деления 0,001 мм.

Рентгеноструктурный анализ карбидохромовых покрытий проводили с поверхности образца и по всей толщине покрытия на рентгеновском дифрактометре Rigaku. Съём рентгенограмм производился с поверхности

образцов, подвергавшихся последовательному шлифованию через 25 мкм на глубину 300 мкм. Диапазон исследуемых углов изменялся в пределах 20...140°.

Прочность сцепления покрытия с подложкой определялась методом сдвига на машине ИМ-4А.

Сравнительную износостойкость образцов с карбидохромовыми покрытиями исследовали на машине трения СМЦ-2 в условиях граничной смазки. Испытания на износ проводили при удельном давлении 1,275 МН/м² или 250Н и скорости скольжения 0,786 м/с ($n = 300 \text{ мин}^{-1}$). В зону трения образцов подавалось масло индустриальное И-20А ГОСТ 20779, запыленное кварцевым абразивом по ГОСТ 2138 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 выдерживалась в диапазоне 60...80°С. По истечении трёх часов образцы извлекались, мылись ацетоном, обдувались струёй сжатого воздуха и взвешивались на лабораторных весах ВМ-II с точностью до 0,1мг. Данный цикл повторялся до полного истирания осаждённого покрытия.

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 толщиной 100 мкм.

Для проведения эксплуатационных испытаний опытные образцы распылителей были установлены на новые топливные форсунки ФД-22 на двигателях: Д-240 трактора МТЗ-80, Д-243 трактора МТЗ 82.1, ЯМЗ-236М2 на трактор ХТЗ Т-150К. Всего к испытаниям было подвергнуто 22 распылителя.

Математическая обработка результатов экспериментов проводилась по методике обработки результатов испытаний.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований.

Проведён сравнительный металлографический анализ сталей 12Х2Н4А и Р6М5 до и после осаждения на них карбидохромового покрытия (рисунок 8). Структура сталей Р6М5 и 12Х2Н4А после нанесения покрытия не изменилась.

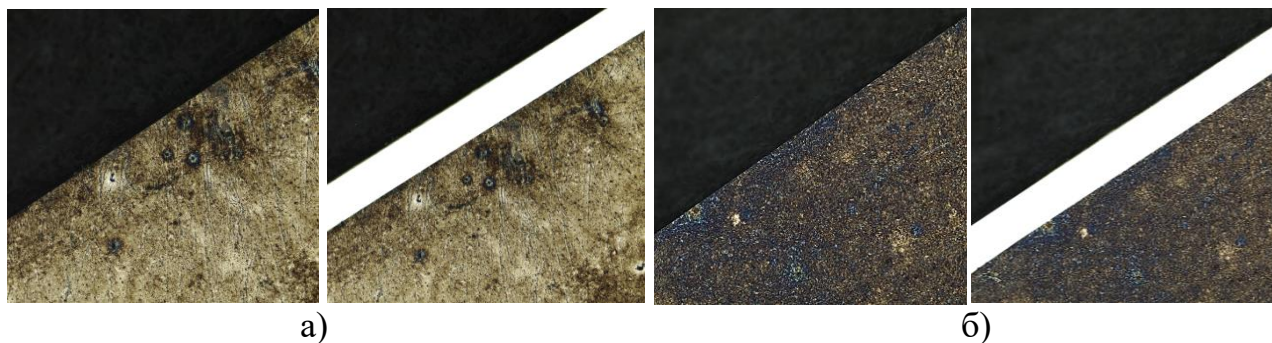


Рисунок 8 – Микроструктура поверхности сталей при увеличении в 200 раз до и после нанесения покрытия: а) – 12Х2Н4А; б) – Р6М5.

Для подтверждения теоретических исследований и поиска оптимального режима ведения металлизации провели серию опытов по низкотемпературному осаждению карбидохромового покрытия на детали-образцы при давлении

вакуума 0,1, 0,01 и 0,001 Па, температурах подложки 150, 175 и 195 °С и МОС 60°С со скоростью подачи реакционной среды 1, 2 и 3 л/час. Металлографическое исследование микрорельефа поверхности карбидохромового покрытия показало, что структура горизонтальная и содержит в себе примеси оксида хрома. Прогиб деталей не обнаружен.

Установлена оптимальная скорость подачи реактива в реакционную камеру 1,5 л/час, что обеспечивает максимальный прирост покрытия. Производить осаждение карбида хрома при подаче реакционной среды свыше неэффективно, так как снижается скорость роста покрытия и увеличивается расход реактива гексакарбонила хрома из-за низкой энергии изобарно-изотермического потенциала и эндотермичности химической реакции термораспада (рисунок 9 а).

Установлено влияние давления вакуума на скорость осаждения карбидохромового покрытия в зависимости от температурного режима подложки при постоянной скорости подачи гексакарбонила хрома (рисунок 9 б). С увеличением давления вакуума и уменьшением температуры подложки снижается количество примесей и уменьшается скорость осаждения карбидохромового покрытия.

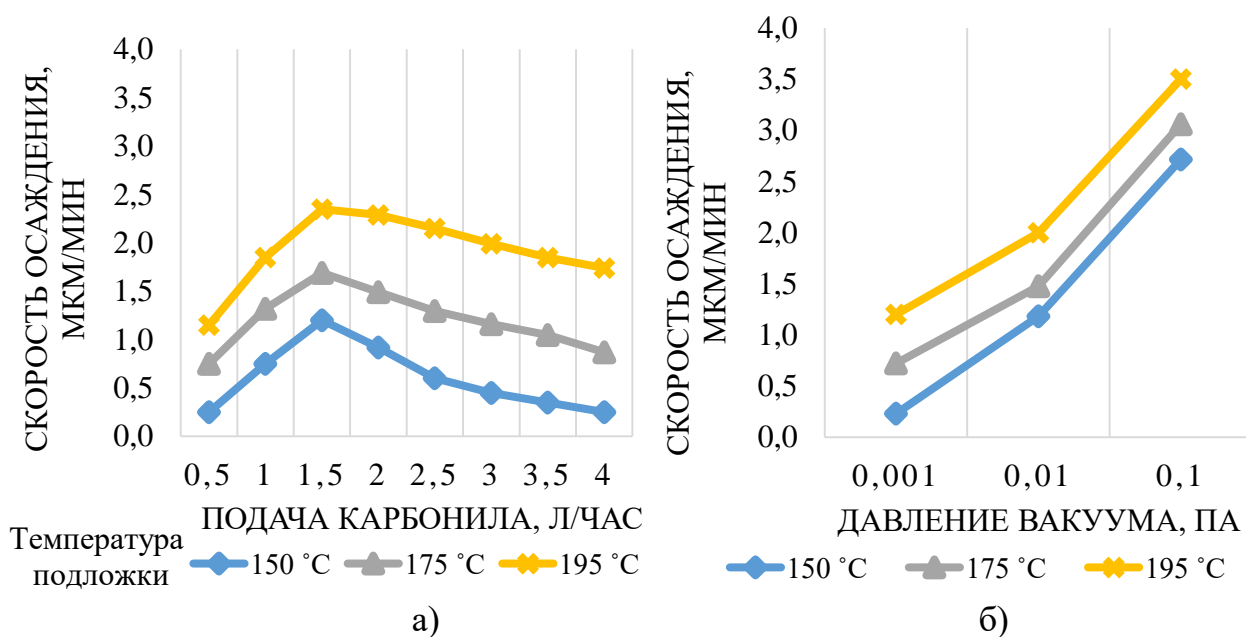


Рисунок 9 – Влияние подачи реакционной среды (а) и давления вакуума (б) на скорость осаждения Cr_3C_2 при температурах подложки 150, 175 и 195°С.

Установлена зависимость роста микротвёрдости покрытия при увеличении давления вакуума и уменьшении температуры подложки в реакторе (рисунок 10). 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 примеси в виде включений оксида хрома ухудшают его микротвёрдость.

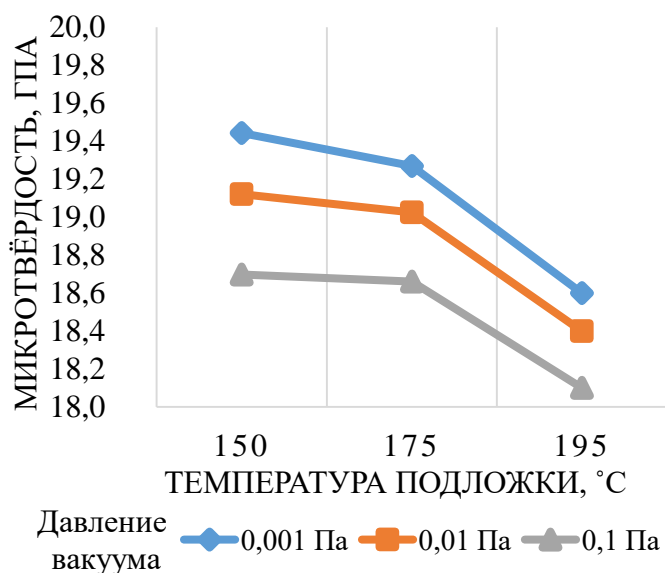


Рисунок 10 – Влияние давления вакуума на микротвёрдость карбидохромового покрытия при температурах подложки 150, 175 и 195 °С и МОС 60 °С при скорости подачи реакционной среды 1,5 л/час.

вакуума (а), температуре подложки (б) и подаче реакционной среды (в), которые имеют следующий вид:

$$а) \quad H_{ГПа} = 19,42 + 38,16X_1 - 0,52V - 474,28X_1^2 + 6,83X_1V - 0,07V^2 \quad (17)$$

$$б) \quad H_{ГПа} = -4,61 + 0,3X_2 - 1,44V - 0,001X_2^2 + 0,007X_2V - 0,018V^2 \quad (18)$$

$$в) \quad H_{ГПа} = 20,03 - 0,54X_3 - 0,42V + 0,11X_3^2 - 0,039X_3V + 0,041V^2 \quad (19)$$

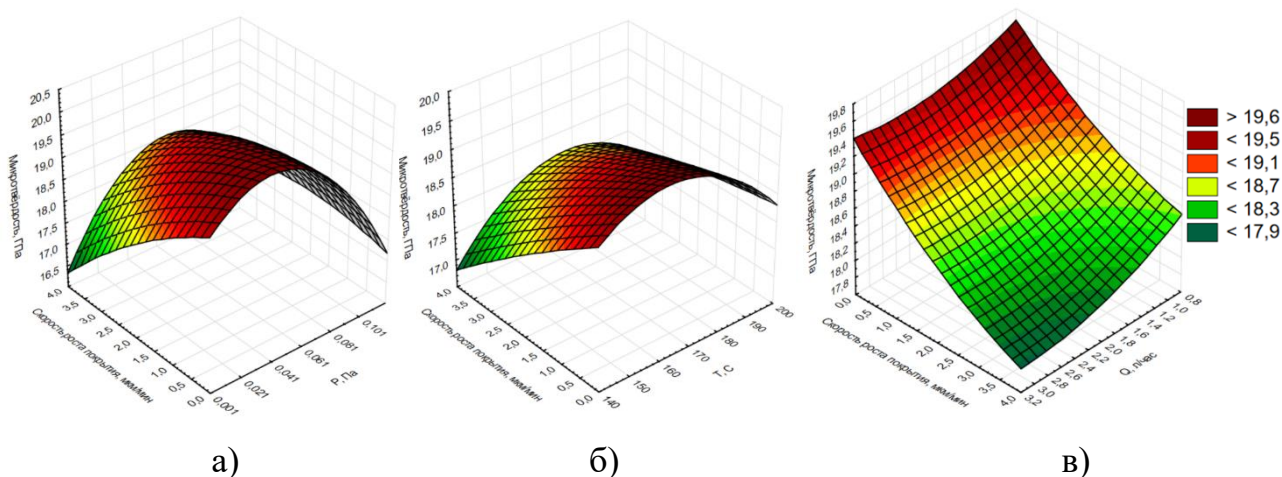


Рисунок 11 – Зависимость изменения микротвёрдости от скорости роста покрытия при: а) давлении вакуума; б) температуре подложки; в) подаче реакционной среды.

Оптимальный режим осаждения карбида хрома Cr_3C_2 на стальных деталях распылителя форсунки: давление вакуума 0,025 Па; температура подложки 161 °С, подача реакционной среды 1,0 л/час и температура паров гексакарбонила хрома 60 °С.

На основании проведённых исследований по формированию карбидохромового покрытия решена задача поиска оптимального режима при условии обеспечения максимальной микротвёрдости и скорости роста в условиях минимальной подачи реактива.

Оценка значимости факторов, влияющих на формирование покрытия показала, что температура подложки и давление вакуума более значимы, чем подача реакционной среды.

Установлены уравнения регрессии и определены функции отклика зависимостей изменения микротвёрдости от скорости роста покрытия (рисунок 11), соответственно, при давлении

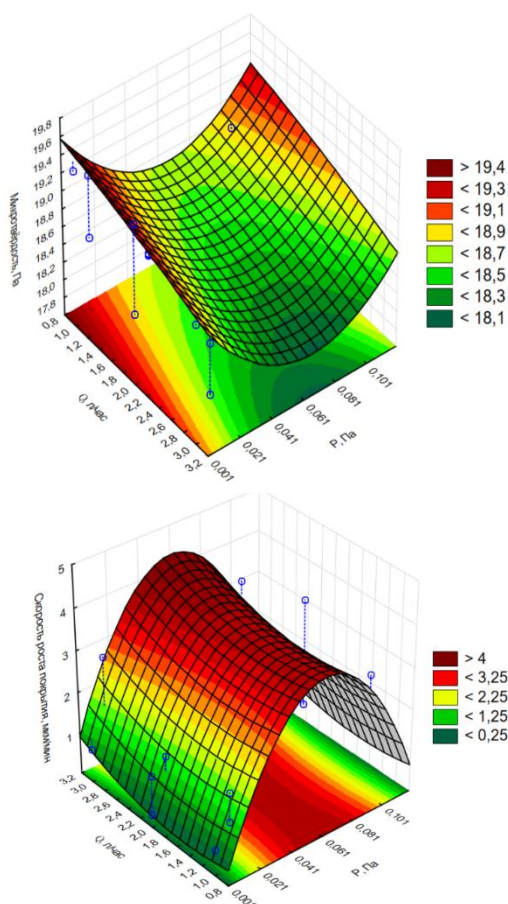


Рисунок 12 – Модель прогнозирования микротвёрдости и скорости роста покрытия в зависимости от подачи карбонила и давления вакуума при температуре подложки 161 °С.

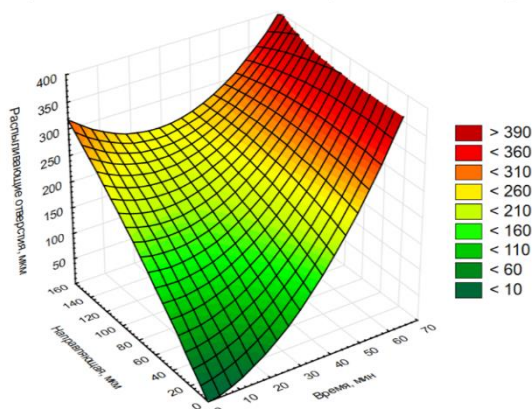


Рисунок 13 – Зависимость приращения диаметров распыляющих отверстий и направляющей корпуса от времени металлизации.

нагрузке 1Н (рисунок 14) 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.

Построена параметрическая модель (рисунок 12), позволяющая прогнозировать микротвёрдость и скорость осаждения карбидохромового покрытия в зависимости от подачи реакционной среды и давления вакуума при температуре подложки 161°С.

Скорость осаждения покрытия в распыляющих отверстиях и в направляющей части распылителя взаимосвязана (рисунок 13). Установлена скорость осаждения покрытия на оптимальном режиме в направляющей 2,2 мкм/мин, а в распыляющих отверстиях 6,8 мкм/мин. Формирование карбида хрома Cr_3C_2 в распыляющих отверстиях осуществляется при протяжке реакционной среды через них.

Сцепляемость покрытия с подложкой обеспечивается за счёт дегазации восстанавливаемых поверхностей и формирования на них адгезионного подслоя из карбида хрома путём заполнения микронеровностей, находящихся на границе раздела «деталь-покрытие». Последний процесс осуществляется при подаче реакционной среды 0,1 л/час и скорости формирования покрытия 0,2 мкм/мин. Продолжительность – 2 минуты.

Продолжительность восстановления геометрических размеров деталей при толщине покрытия 45,625 мкм на направляющей и 139,45 мкм на распыляющих отверстиях составляет 23 минуты. В условиях упрочнения деталей при серийном выпуске время осаждения покрытия с толщиной 5 мкм составит до четырёх минут. Коэффициент использования реактива более 80%.

Глубина отпечатка индентора при

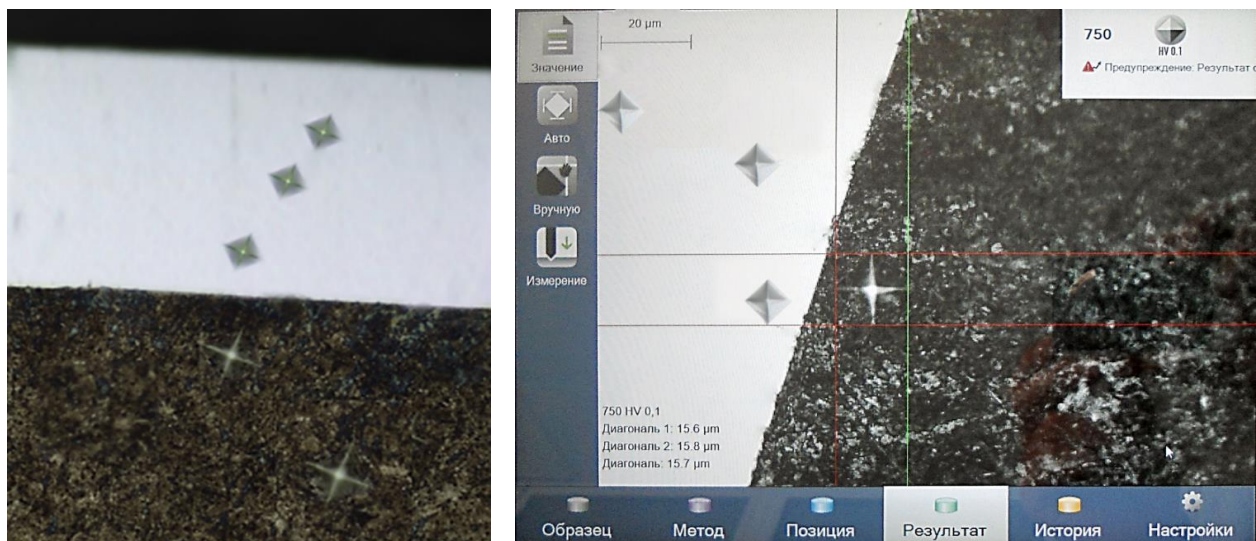


Рисунок 14 – Определение микротвёрдости карбидохромового покрытия и подложки при нагрузке 1Н после парофазной металлизации при давлении вакуума 0,025Па, скорости подачи реакционной среды 1,0 л/час и температур подложки 161 °С и паров гексакарбонила хрома 60 °С.

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 больше требуемой, установленной теоретически 16,8 ГПа, на 2,16 ГПа.

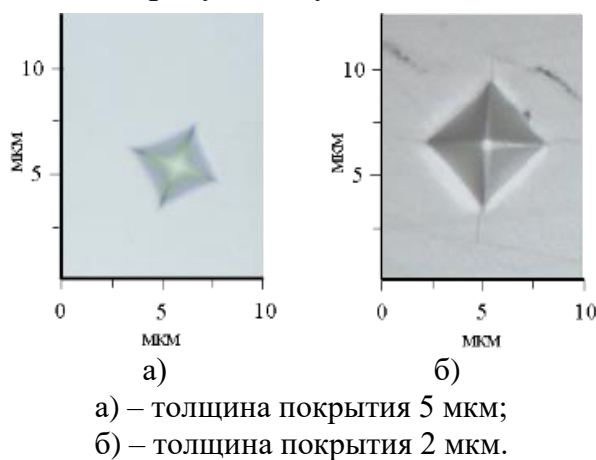


Рисунок 15 – Отпечаток от индентора на карбидохромовом покрытии после приложенной нагрузки 0,2Н.

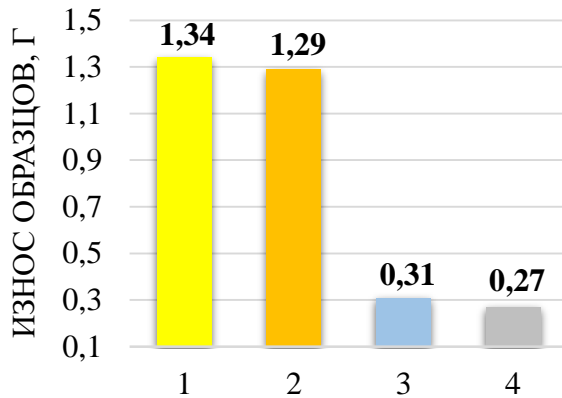
Оптимальная толщина покрытия на новых серийно выпускаемых деталях должна быть не менее 5 мкм, что обеспечит высокую их надёжность.

Результаты рентгеноструктурного и масс-спектрального анализов установили, что карбидохромовое покрытие, получаемое с помощью термического разложения гексакарбонила хрома при вакууме 10^{-1} , 10^{-2} и 10^{-3} Па и температуре осаждения ниже 200 °С, состоит в основном из карбида хрома Cr_3C_2 , в котором присутствуют примеси оксида хрома Cr_2O_3 . Наибольшая концентрация карбида хрома наблюдается при давлении вакуума 10^{-3} Па.

Для проверки несущей способности карбидохромового покрытия, предназначенного для упрочнения серийных деталей, проверку вели с нагрузкой 0,2 Н (рисунок 15) 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. Шероховатость поверхности Ra0,05.

Установлено, что ведение металлизации при постоянном давлении вакуума с понижением температуры подложки приводит к снижению содержания в покрытии остаточных напряжений. С увеличением толщины покрытия в его структуре увеличиваются остаточные напряжения. При толщине 50 мкм остаточные напряжения равны 0,56 МПа, при 100 мкм – 0,75 МПа.

Адгезия покрытия при толщине 100 мкм составила 34 МПа, полученного на режиме: давление вакуума 0,025 Па; скорость подачи реакционной среды 1,0 л/час; температуры подложки 161°С и гексакарбонила хрома 60°С.



- 1 – сталь 12Х2Н4А с цементацией и закалкой (61...63 HRC);
 2 – сталь Р6М5 с объёмной закалкой (62...64 HRC);
 3 – сталь 12Х2Н4А с упрочняющим покрытием (18,96 ГПа);
 4 – сталь Р6М5 с упрочняющим покрытием (19,4 ГПа).

Рисунок 16 – Износ образцов.

Установлена интенсивность изнашивания образцов с карбидохромовым покрытием и без него. На образцах сталей 12Х2Н4А и Р6М5 без упрочняющего покрытия после испытаний наблюдается множество продольных борозд, царапин и выровов, образованных в результате абразивного изнашивания и схватывания.

На упрочнённых образцах с микротвёрдостью поверхности 18,96 и 19,4 ГПа отсутствуют риски, борозды, сколы и другие дефекты. Кроме того, между ними нет явных отличий по износу. Относительная износостойкость упрочнённых образцов к неупрочнённым составила 4,1...5 раза (рисунок 16). Упрочняющее покрытие позволило исключить повреждение поверхностей частицами кварца, присутствующими в зоне

трения. При восстановлении и упрочнении деталей распылителя форсунки целесообразно осаждать на поверхностях иглы и корпуса 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.

Исследование коррозионной стойкости образцов (рисунок 17) из сталей 12Х2Н4А, Р6М5 и стали Р6М5, защищённой покрытием из карбида хрома, показало, что карбидохромовое покрытие на сталях приводит к повышению коррозионной стойкости деталей.

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 NaOH 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.

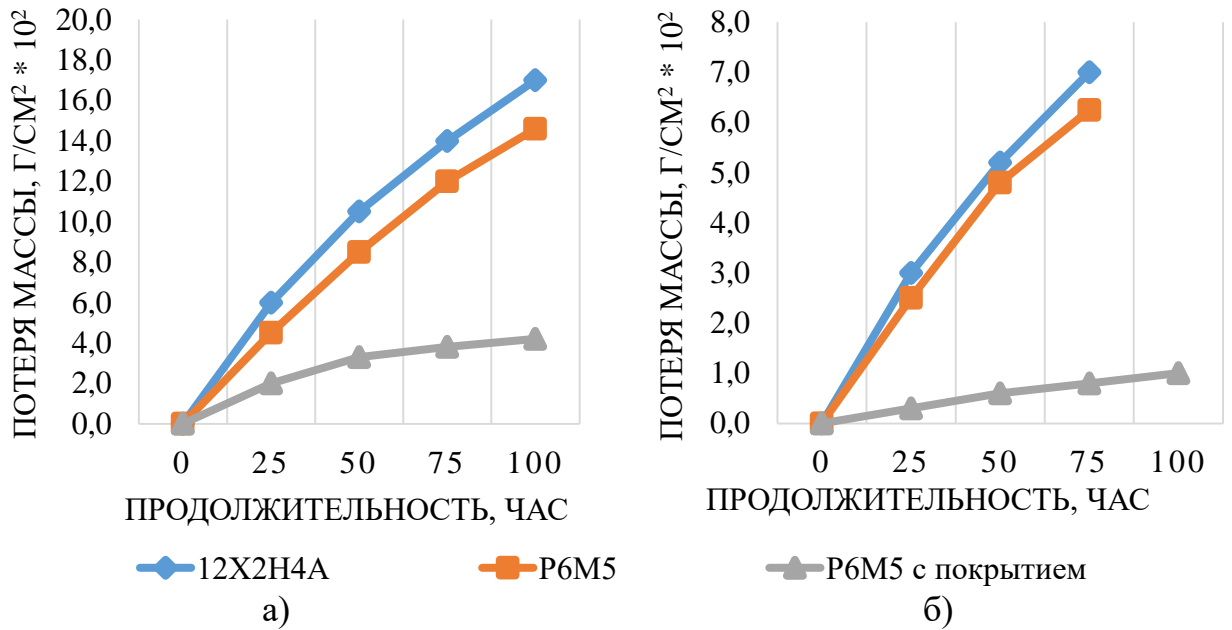


Рисунок 17 – Испытания на коррозионную стойкость образцов сталей в коррозионной среде.

За наблюдаемый период с момента начала проведения эксплуатационных испытаний с марта 2023 по август 2023 отказов не наблюдалось. Трактора эксплуатировались в полевых условиях на посевных, кормозаготовительных и транспортировочных работах. Нароботка форсунок составила в среднем 575 мото-ч. Эксплуатационные испытания продолжаются. Общий вид восстановленного распылителя показан на рисунке 18.

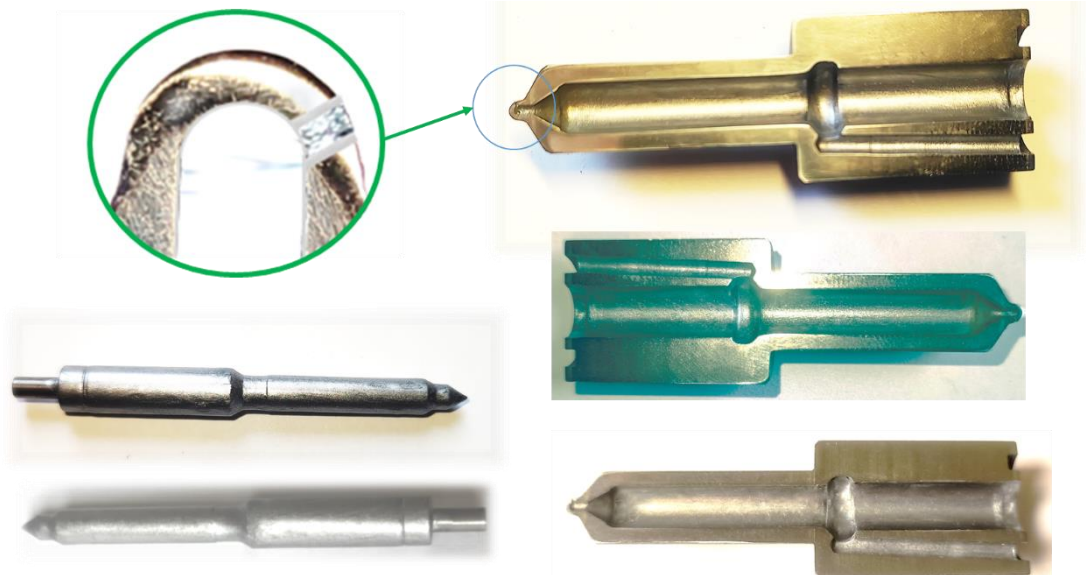


Рисунок 18 – Внешний вид восстановленных деталей распылителя форсунки.

В пятой главе представлено подробное описание технологических процессов восстановления деталей распылителя форсунки, приведены результаты расчета экономического эффекта от внедрения разработанной

технологии и приводится сопоставление себестоимости эксплуатации дизелей с упрочнёнными распылителями и серийными.



Рисунок 19 – Оценочная стоимость серийных и упрочнённых распылителей относительно ресурса.

деталью выгоднее по отношению к серийным при минимальной выработке ресурса на 15,52 рублей/мото-ч, а при максимальной на 0,34 рублей/мото-ч (рисунок 19). Комплектация распылителей с двумя упрочнёнными деталями по отношению к одной приводит к снижению затрат на их эксплуатацию в 1,6...2,31 раза.

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. Срок окупаемости 2,1 года.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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 Cr₃C₂.

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.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

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.

Среди **ПЕРСПЕКТИВ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ** можно выделить следующие основные направления:

1. Исследования в области термодинамики протекания химических реакций и управления ими в реакторе CVD-установки для получения покрытий с требуемым химическим составом и повышение коэффициента использования реакционной среды.

2. Разработка автоматизированных CVD-установок, позволяющих осаждать моно-, композитные и комбинированные упрочняющие покрытия на внешних и внутренних поверхностях деталей машин.

3. Разработка новых низкотемпературных способов получения износостойких покрытий на деталях машин с помощью парофазной химической металлизации (CVD).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК Российской Федерации:

1. **Логачёв, К.М.** Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, А.Г. Пастухов, Д.М. Скороходов, К.М. Логачёв // Сельскохозяйственные машины и технологии. - 2022. - Т. 16.- № 3 – С. 4-11.

2. **Логачёв, К.М.** Модернизация CVD-установки для осаждения карбидов хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки дизельных двигателей// Агроинженерия. - 2023. - Т. 25. - № 3 – С. 84-90.

Патенты, авторские свидетельства:

3. **Логачёв, К.М.** Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки: RU 216021 U1 : МПК⁵¹ C23C 16/32, C23C 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.

Научные статьи, материалы конференций, тезисы докладов:

4. **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

5. **Логачёв, К.М.** Влияние износа деталей распылителей форсунок на показатели автотракторных дизелей / Д.М. Скороходов, К.М. Логачёв // Доклады ТСХА, Москва, 02–04 декабря 2020 года. Том ВЫПУСК 293 Часть III. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. – С. 377-380.

6. **Логачёв, К.М.** Анализ способов восстановления деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей / Д.М. Скороходов, О.В. Чеха, К.М. Логачёв // Научно-исследовательские публикации. – 2022. – № 3. – С. 61-65.

7. **Логачёв, К.М.** Обоснование выбора технологии восстановления прецизионных деталей распылителя форсунок дизельных двигателей / К.М. Логачёв // Студенчество России: век XXI: Материалы VIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции. В 3-х частях, Орёл, 15 декабря 2021 года. Том Часть 2. – Орёл: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2022. – С. 309-317.

8. **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.

9. **Логачёв, К.М.** Факторы, влияющие на образование карбидохромового покрытия на деталях распылителей форсунок автотракторных дизелей при термическом разложении гексакарбонила хрома / Д.М. Скороходов, К.М. Логачёв // Заметки ученого. – 2023. – № 3. – С. 185-190. – EDN ВУХLMV.

10. **Логачёв, К.М.** Технология восстановления и упрочнения распылителей форсунок автотракторных дизелей химической парофазной металлизацией / Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева // секция Инновационная техника и технологии.: М. – 2023.

Монография:

11. **Логачёв, К.М.** Восстановление распылителей форсунок автотракторных дизельных двигателей CVD-методом нанесения карбидохромовых покрытий / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Н.Н. Чупятов, К.М. Логачёв, Д.М. Скороходов, О.В. Чеха // Современная агроинженерия: коллективная монография / Под ред. академика, д.т.н, профессора О.Н. Дидманидзе, к.т.н., Д.М. Скороходова / ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». М.: ООО «Мегаполис», 2022. – С. 240 – 252.