

## ИННОВАЦИОННЫЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ФОРСУНОК ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**С. П. Казанцев, К. М. Логачёв**

*ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** *Технология обеспечивает равномерное карбидохромовое покрытие с микротвёрдостью до 19 ГПа на труднодоступных поверхностях, включая отверстия 0,2 мм, и сокращение времени осаждения. Установлены оптимальные режимы по формированию покрытия. Покрытия имеют повышенную износ- и коррозионную стойкость, увеличивая ресурс распылителей до 10000 мото-ч. Экономический эффект от внедрения технологии превышает 85 млн рублей за 5 лет.*

**Ключевые слова:** *покрытие, карбид хрома, низкотемпературный процесс, распылитель форсунки, вакуум, микротвёрдость, толщина, поверхность.*

## INNOVATIVE TECHNIQUE FOR THE REFURBISHMENT AND REINFORCEMENT OF DIESEL ENGINE FUEL INJECTORS

**S. P. Kazantsev, K. M. Logachev**

*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** *The technology ensures a uniform chromium carbide coating with a microhardness of up to 19 GPa on hard-to-reach surfaces, including 0.2 mm orifices, and reduces deposition time. Optimal coating formation regimes have been established. The coatings exhibit enhanced wear and corrosion resistance, increasing the service life of the injectors to 10,000 operating hours. The economic benefit from the implementation of this technology is estimated to exceed 85 million rubles over 5 years.*

**Keywords:** *coating, chromium carbide, low-temperature process, fuel injector, vacuum, microhardness, thickness, surface.*

### **Введение**

К сельскохозяйственным машинам, работающим в тяжёлых условиях, предъявляются высокие требования по надёжности. Анализ статистики отказов работы дизелей свидетельствует о том, что более 40 % случаев отказов двигателей приходится на топливную аппаратуру. Из них двенадцатую часть занимает форсунка. Не менее 66 % неисправностей форсунок автотракторных дизелей приходится на распылитель.

Ресурс отечественных распылителей не превышает 4000 м·ч, что ниже, чем у зарубежных изготовителей в 3,7 раза [1].

Основные изнашиваемые части распылителя это: направляющая поверхность, запорный конус и распыляющие отверстия. Максимальная величина износа достигает 78 мкм [2]. Основные причины износа деталей распылителя – это неудовлетворительная фильтрация топлива и недостаточная микротвёрдость рабочих поверхностей. В работах профессоров Ачкасова К. А. и Бугаева В. Н., посвященных повышению надёжности топливной аппаратуры дизелей, доказано, что необходимый уровень упрочнения должен составлять не менее 14 ГПа.

Отечественные распылители форсунок изготавливают из различных марок сталей, твёрдость которых после термической и химико-термической обработки имеют 59...64 HRC. В то время как микротвёрдость абразивных частиц достигает 21 ГПа. Для сохранения физико-механических свойств сталей при восстановлении и упрочнении распылителей температурное воздействие не должно превышать 200 °С [3].

Разработанные методы восстановления распылителей форсунок дизелей, в том числе в МГАУ имени В. П. Горячкина, не позволяют восстанавливать ремфонд в полном объёме из-за недостаточной толщины получаемых покрытий [4]. Перегрев деталей приводит к их короблению и отпуску стали. Коробление прецизионных деталей после высокотемпературных процессов борирования, титанирования и хромирования возникает в результате релаксации внутренних напряжений и роста зерна в стали. Для сохранения несущей способности получаемых износостойких покрытий, требуется повторная закалка [3]. Это дополнительно увеличивает деформацию корпуса и иглы распылителя форсунки. При последующем формировании геометрии прецизионных деталей необходим дополнительный припуск на шлифование. Разнотолщинность покрытия приводит к неравномерной твёрдости рабочей поверхности.

### **Цель работы**

Разработка низкотемпературной технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома при температуре технологического процесса ниже уровня отпуска сталей, применяемых при изготовлении деталей распылителя.

### **Методика 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.

### **Результаты исследования**

Установлены основополагающие требования, базирующихся на устранении недостатков существующих способов, к новой технологии восстановления и упрочнения распылителей [1]:

- получение на поверхностях деталей износостойкого слоя с микротвёрдостью не менее – 16,8 ГПа;
- технологический процесс получения покрытия должен быть осуществим при температуре ниже 200°C;
- покрытие должно быть нанесено и на труднодоступные поверхности деталей, включая диаметр отверстий 0,2 мм;
- шероховатость поверхности покрытия Ra0,05;
- продолжительность формирования покрытия до 1 часа;
- сцепляемость покрытия с подложкой не менее – 15 МПа.

Одним из фундаментальных свойств термодинамических систем является их способность приходить в состояние равновесия при неизменных внешних условиях. Это означает, что система будет находиться в таком состоянии сколь угодно долго, не испытывая макроскопических изменений, пока не подвергнется внешним воздействиям. В виду этого нанесение равномерных износостойких покрытий, имеющих заранее заданные характеристики, из карбида хрома на поверхности деталей возможно, и такое свойство системы будет способствовать их формированию.

Впервые предложено использовать гипотезу двух приближений для определения минимальной температуры термического распада гексакарбонила хрома с последующей химической парофазной металлизацией в условиях вакуума. На первом этапе необходимо установить возможность протекания химических реакций в реакционной камере CVD-установки, а на втором — определить зависимость снижения температуры разложения карбонила и начала металлизации в вакууме. Это позволяет оптимизировать условия нанесения покрытий на детали распылителя форсунки, что может улучшить их эксплуатационные характеристики.

Анализ термодинамики разложения гексакарбонила хрома в работах В. Г. Сыркина и Н. Н. Чупятова позволил обосновать нижний порог температуры процесса в 300°C [5].

Нами получено новое уравнение регрессии энергии Гиббса (1), которое определяет изотермический потенциал, и теоретически обоснованно снижение температуры разложения гексакарбонила хрома с 300 до 123°C (рисунок 1).

$$G(T, P) = 141,6 - 0,98T + 0,004P - 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 9,4 \cdot 10^{-7} \cdot TP - 4,1 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 \quad (1)$$

где  $G(T, P)$  – изменение энергии Гиббса в зависимости от температуры подложки и глубины вакуума, кДж;  $T$  – температура начала (завершения) протекания термодинамической реакции, К;  $P$  – глубина вакуума в реакторе CVD-установки, Па.

Температура подложки, °С	Глубина вакуума в реакторе CVD-установки, Па								
	101 325	10 000	1 000	100	10	1	0,1	0,01	0,001
	Изобарно-изотермический потенциал $\Delta G$ , 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
<b>150</b>	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
<b>300</b>	-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	191,00	181,00	172,00	163,00	154,00	146,00	138,00	130,00	123,00
Исследователи	В.Г. Сыркин			М.Н. Ерохин, Н.Н. Чупятов			С.П. Казанцев, К.М. Логачёв		

**Рисунок 1 – Изменения энергии Гиббса в зависимости от глубины вакуума и температуры подложки**

Для определения необходимого уровня микротвёрдости и несущей способности карбидохромового покрытия были рассмотрены три схемы нагружения направляющей поверхности распылителя. Выведена формула для определения критической толщины износостойкого слоя в зависимости от размера абразивной частицы, её твёрдости и твёрдости покрытия [6].

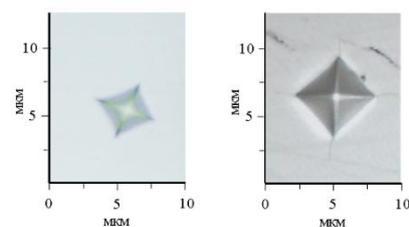
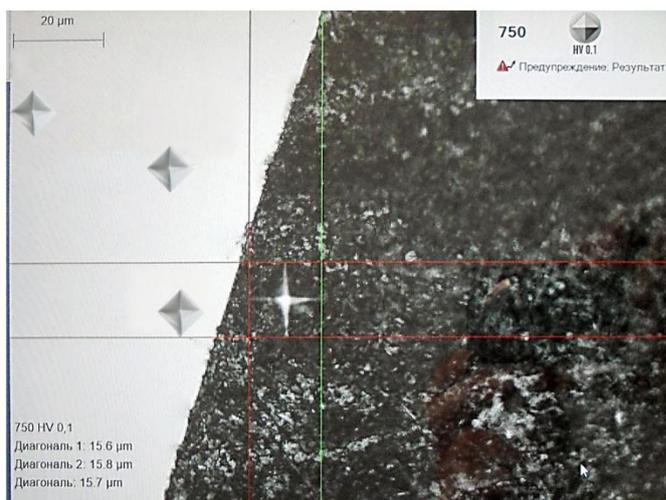
Для восстановления ремфонда в полном объёме нами выведены формулы определения толщины покрытия для направляющей и распы-

ляющих отверстий [1]. Особенностью формул является отсутствие величины коробления деталей. Несущая способность покрытия составила 0,082 мкм, что является критическим значением для поддержания структурной целостности покрытия. Кроме того, установлены оптимальные толщины покрытия, необходимые для восстановления ремфонда на различных поверхностях деталей распылителя. В направляющей части эта толщина составила 45,6 мкм, а в распыляющих отверстиях – 139,5 мкм. Для серийного производства распылителей было рекомендовано, чтобы толщина покрытия составляла не менее 3 мкм [6].

Для нанесения карбидохромового покрытия на иглы распылителя применялась вакуумная CVD-установка. Равномерное осаждение покрытия обеспечивалось за счёт вращения рабочего стола [5]. Скорость вращения 50 об/мин. Данный способ не позволяет наносить покрытие на внутренние труднодоступные поверхности корпуса распылителя. Для решения этой проблемы нами разработан новый способ с применением нового типа реактора с индивидуальным нагревом корпусов распылителя [7]. Равномерное осаждение обеспечивается за счёт протяжки реакционной среды [8].

В работе экспериментально исследовали влияние глубины вакуума и скорости подачи карбонила в реакционную камеру, что позволило определить скорость осаждения покрытия и его микротвёрдость. Проведенный многофакторный эксперимент позволил получить функции отклика, отражающие зависимость характеристик покрытия от скорости его роста, подачи реакционной среды и глубины вакуума. Экспериментальные исследования позволили установить влияние различных факторов на микротвёрдость и скорость роста карбидохромового покрытия.

Анализ микроструктуры карбидохромового покрытия, полученного при температуре 195°C и глубине вакуума в диапазоне от 0,1 до 0,001 Па, показал микротвёрдость до 19,4 ГПа. Используемый температурный режим не влияет на изменение структуры сталей 12Х2Н4А и Р6М5 [1]. Оптимальный режим для нанесения качественного карбидохромового покрытия включает глубину вакуума 0,025 Па, температуру подложки 161°C, подачу реакционной среды 1,0 л/час и температуру реакционной среды 60°C. При таких условиях достигается максимальная микротвёрдость до 19 ГПа при скорости роста 2,5 мкм/мин. При этом микротвёрдость покрытия остаётся равномерной по всей его длине и толщине, что является важным показателем качества покрытия (рисунок 2).



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

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

Отношение диагоналей отпечатков от индентора на карбидохромовом покрытии и подложке после приложенной нагрузки 1,0Н

## Рисунок 2 – Определение микротвёрдости карбидохромового покрытия и подложки при нагрузке 1Н после парофазной металлизации на оптимальном режиме

Рентгеноструктурный анализ показал, что покрытия, полученные методом термического разложения гексакарбонила хрома при различных глубинах вакуума  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  и  $10^{-3}$  Па и температуре осаждения  $161^{\circ}\text{C}$ , состоят из карбида хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  с примесями оксида хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Кроме того, масс-спектральный анализ показал, что наибольшая концентрация карбида хрома и наименьшая концентрация примесей наблюдаются в образце с покрытием, полученным при глубине вакуума  $10^{-3}$  Па.

Карбидохромовые покрытия показывают существенное повышение адгезии к подложке по сравнению с электролитическим хромированием – в 2,3 раза, достигая значения 34 МПа. Это указывает на то, что метод CVD обеспечивает более прочную связь между покрытием и подложкой, что важно для повышения долговечности и эксплуатационных характеристик изделий. Применение никелевого подслоя толщиной до 5 мкм позволяет увеличить сцепляемость карбида хрома еще в 2 раза [9].

Испытания на машине трения показали, что износостойкость упрочнённых образцов к неупрочнённым составляет 4,1...5 раза. Коррозионные испытания образцов в среде азотной и серной 10 % кислоты показали, что коррозионная стойкость упрочнённых образцов в 3,5...4 раза выше.

На основе проведённых исследований разработана структурная схема технологического процесса восстановления распылителей и предложены рекомендации производству [10].

В соответствии с износными испытаниями ресурс упрочнённых распылителей не менее 10 000 мото-ч, что выше в 2,5 раза в сравнение с серийными. Срок эксплуатации не менее 2,6 года при годовой наработке автотракторного дизеля 3800 мото-ч.

Экономический эффект новой технологии более 85 млн рублей при изготовлении и реализации 855,5 тыс. единиц за 5 лет. При этом рентабельность технологии – 45,57 %. Срок окупаемости составит 2,1 года при объёме капиталовложений 23 млн рублей.

### **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, исключаящем коробление прецизионных деталей.

2. Обоснована возможность протекания химических реакций разложения соединений гексакарбонила хрома в реакторе CVD-установки при минимальной температуре нагрева деталей 123°C и глубине вакуума 0,001 Па с последующим образованием карбидов хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ .

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 для осаждения карбидохромовых покрытий на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя.

5. Покрытия имеют равномерную по толщине микротвёрдость до 19,4 ГПа, шероховатость поверхности не выше  $Ra_{0,05}$ . Прочность сцепления карбидохромового покрытия с подложкой – 34 МПа.

6. 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.

7. Экономической эффект от внедрения разработанной технологии за 5 лет составит более 85 млн рублей. Рентабельность технологии 45,57 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев, К. М. Разработка технологии восстановления распылителей форсунок автотракторных дизелей термическим разложением соединений гексакарбонила хрома : дис. ... канд. техн. наук / Логачев Константин Михайлович, 2023. – 216 с.
2. Скороходов, Д. М. Влияние износа деталей распылителей форсунок на показатели автотракторных дизелей / Д. М. Скороходов, К. М. Логачёв // Доклады ТСХА, Москва, 02-04 декабря 2020 года. Выпуск 293, Часть III. – М. : Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2021. – С. 377-380.
3. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, А. Г. Пастухов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 4-11. – DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11.
4. Скороходов, Д. 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.
5. Современная агроинженерия / В. И. Трухачев, О. Н. Дидманидзе, М. Н. Ерохин [и др.]. – М. : ООО «Мегаполис», 2022. – 413 с. – ISBN 978-5-6049928-2-1.
6. Критическая толщина упрочняющего покрытия на рабочих поверхностях деталей распылителя форсунки / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, И. Ю. Игнаткин [и др.] // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 56-62. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-6-56-62.
7. Патент на полезную модель № 216021 U1 Российская Федерация, МПК С23С 16/32, С23С 16/54. Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки: № 2022120149: заявл. 22.07.2022: опубл. 13.01.2023 / М.Н. Ерохин, С. П. Казанцев, Н. Н. Чупятов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».
8. Логачев, К. М. Модернизация CVD-установки для осаждения карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки дизельных двигателей / К. М. Логачев // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 84-90. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-3-84-90.
9. 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. – 2017. – С. 924-929.
10. Логачев, К. М. Технология восстановления и упрочнения распылителей форсунок автотракторных дизелей химической парофазной металлизацией / К. М. Логачев // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К. А. Тимирязева : сборник

статей, Москва, 05-07 июня 2023 года. – М. : Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2023. – С. 473-478.

***Об авторах:***

**Казанцев Сергей Павлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и деталей машин ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», kazansev@rgau-msha.ru.

**Логачёв Константин Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», klogachyov@mail.ru.

***About the authors:***

**Sergei P. Kazantsev**, D.Sc. (Engineering), professor, Head of the Department of Strength of Materials and Machine Parts, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, kazansev@rgau-msha.ru.

**Konstantin M. Logachev**, Cand.Sc. (Engineering), associate professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, klogachyov@mail.ru.