

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-56-62>**Критическая толщина упрочняющего покрытия на рабочих поверхностях деталей распылителя форсунки****М.Н. Ерохин¹, С.П. Казанцев², И.Ю. Игнаткин³, К.М. Логачев⁴, Д.М. Скороходов⁵**^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>² kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>³ ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>⁴ klogachyov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-3474-7591>⁵ d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>

Аннотация. Эксплуатация автотракторной техники производится в условиях высокой запыленности. Основной причиной низкого ресурса прецизионных деталей топливной аппаратуры является абразивное изнашивание рабочих поверхностей. Инновационный CVD-метод получения покрытий путем термического разложения гексакарбонила хрома с последующим осаждением карбидов хрома позволяет значительно повысить износо- и коррозионную стойкость деталей распылителя форсунки дизельных двигателей. Для повышения ресурса распылителя предлагается нанесение упрочняющего покрытия на обе рабочие поверхности деталей: иглу (сталь Р6М5) и внутреннюю поверхность корпуса (сталь 12Х2Н4А). С целью минимизации затрат при изготовлении новых прецизионных деталей определялась критическая (минимальная) толщина покрытия, обеспечивающая его несущую способность. Получены аналитические зависимости минимально необходимой толщины покрытия в зависимости от его микротвердости и размера частиц кварца и корунда, а также уравнения регрессии и графики функции отклика. Установлено, что для обеспечения несущей способности упрочняющего покрытия на деталях распылителя форсунки дизельного двигателя его критическая толщина при микротвердости 18,9 ГПа должна составлять не менее 3 мкм.

Ключевые слова: форсунки дизельных двигателей, поверхность, карбидохромовое покрытие, микротвердость, абразив, разрушение, критическая толщина упрочняющего покрытия, несущая способность, износостойкость

Для цитирования: Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., Логачёв К.М., Скороходов Д.М. Критическая толщина упрочняющего покрытия на рабочих поверхностях деталей распылителя форсунки // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 56-62. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-56-62>

ORIGINAL PAPER

Critical thickness of the hardening coating layer on the working surfaces of injector nozzle parts**M.N. Erokhin¹, S.P. Kazantsev², I.Yu. Ignatkin³, K.M. Logachev⁴, D.M. Skorokhodov⁵**^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>² kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>³ ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>⁴ klogachyov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-3474-7591>⁵ d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>

Abstract. Motor vehicles and tractors operate in conditions of high dustiness. The main reason for the short service life of precision parts of fuel equipment (FI) is the abrasive wear of working surfaces. The innovative CVD method of obtaining coatings by thermal decomposition of chromium hexacarbonyl with subsequent deposition of chromium carbides significantly increases the wear and corrosion resistance of the injector nozzle parts of diesel engines. To increase the service life of the sprayer, the authors propose to apply a hardening coating to both working surfaces of the parts – the needle (steel R6M5) and the inner surface of the housing (steel 12KH2N4A).

In order to minimize costs in the manufacture of new precision parts, the authors determined the critical (minimum) coating thickness, ensuring its load-bearing capacity. They also obtained analytical relationships between the minimum required coating thickness depending on its microhardness and the size of quartz and corundum particles, as well as regression equations and response function graphs. It has been established that in order to ensure the bearing capacity of the hardening coating on the fuel injector nozzle parts of the diesel engine, its critical thickness should be not less than 3 microns at a microhardness of 18.9 GP.

Keywords: diesel engine injectors, surface, chromium carbide coating, microhardness, abrasive material, destruction, critical thickness of hardening coating, load-bearing capacity, wear resistance

For citation: Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu., Logachev K.M., Skorokhodov D.M. Critical thickness of the hardening coating layer on the working surfaces of injector nozzle parts. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(6):56-62. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-56-62>

Введение

Основной причиной изнашивания прецизионных деталей топливной аппаратуры (ТА) является наличие в дизельном топливе абразива и коррозионных веществ. Применение существующих систем фильтрации не позволяет полностью очистить топливо¹. Абразивное изнашивание стальных деталей происходит по причине микрорезания и царапания поверхностей свободными или защемленными абразивными частицами. Несмотря на значительное число научных исследований, посвященных проблеме повышения долговечности прецизионных деталей ТА дизелей, остаются вопросы, которые до настоящего времени решены неполностью.

Для повышения износостойкости деталей распылителя форсунки определяющее значение имеет микротвердость рабочих поверхностей². CVD – метод получения износо- и коррозионностойких покрытий на основе карбидов хрома – является перспективным при разработке технологии упрочнения распылителей форсунок³. В условиях вакуума равномерное нанесение покрытия на рабочие поверхности иглы обеспечивается их установкой на вращательном столе. Внутренние поверхности корпуса предлагается упрочнять направленным потоком реакционной среды [1].

Указанный метод позволяет получить карбидохромовое покрытие с микротвердостью 18,9 ГПа при температуре нагрева деталей в рабочей камере 161°C, что исключает их деформацию (коробление) [2].

При упрочнении деталей распылителя, когда отсутствует необходимость нанесения значительной

толщины покрытия, в технологии необходимо установить ее минимальную (критическую) величину.

Цель исследований: определение критической толщины упрочняющего покрытия на основе карбидов хрома, обеспечивающего несущую способность и износостойкость в условиях абразивного изнашивания.

Материалы и методы

Использовали образцы-свидетели из стали 12X2H4A ГОСТ 4543-71, из которой изготавливают корпус распылителя форсунки. Измерение толщины и микротвердости карбидохромового покрытия производили на металлографическом микроскопе GX53 и твердомере DuraScan 20 G5⁴.

Результаты и их обсуждение

Процесс контактно-абразивного изнашивания при прямом разрушении абразива в условиях его защемления между прецизионными деталями представлен на рисунке 1. Вариант (а) предусматривает использование прецизионной пары без упрочнения деталей. Корпус и игла распылителя имеют одинаковую микротвердость рабочих поверхностей: $H_1 \approx H_2 \approx 7500$ МПа. По варианту (б) на схеме показано упрочнение одной из деталей, при котором $H_3 > H_2$. В третьем случае (с) показана схема с упрочнением двух деталей.

Вариант (а) ввиду интенсивного изнашивания прецизионных деталей не обеспечивает необходимый ресурс распылителей форсунок. При возвратно-поступательном движении иглы относительно корпуса распылителя частицы абразива вызывают деформацию и микрорезание направляющих поверхностей.

Вариант (б) снижает удельную нагрузку на рабочие поверхности прецизионной пары и приводит к разрушению абразива, что способствует увеличению износостойкости.

⁴Быков Ю.А. и др. Определение твердости нанопокровтий: Учебное пособие по курсу «Современные методы исследования структуры материалов» / Ю.А. Быков, С.Д. Карпухин, В.М. Полянский; Под ред. Ю.А. Быкова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 31 с.

¹Готовцева Т.А. Комбинированная очистка топлива в топливных системах машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2013. 161 с.

²Ерохин М.Н. и др. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин: Монография / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Н.Н. Чулятов. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. 140 с.

³Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки: Патент RU216021 U1: МПК C23C16/32, C23C16/54 / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Н.Н. Чулятов [и др.]. № 2022120149: заявл. 22.07.2022; опубл. 13.01.2023, Бюл. № 2.

Согласно данным, приведенным в работе⁵, при упрочнении одной из деталей соединения ресурс в целом увеличивается в 1,7 раза. Упрочнение обеих поверхностей (вариант *с*) позволяет увеличить ресурс в 4,1 раза.

Рассмотрим несущую способность упрочняющего покрытия в системе «Деталь-покрытие-абразив» в условиях статики при нормально приложенной силе со стороны частицы абразива к упрочненной поверхности.

Критерий K_T оценки разрушения поверхности показывает способность абразивных частиц продавливать поверхность с последующим многоцикловым изнашиванием^{5,6}:

$$K_T = \frac{H_M}{H_a}, \tag{1}$$

где H_M и H_a – микротвердость поверхностей детали и абразивной частицы, МПа.

При $K_T < 0,5$ происходит продавливание (разрушение) поверхности.

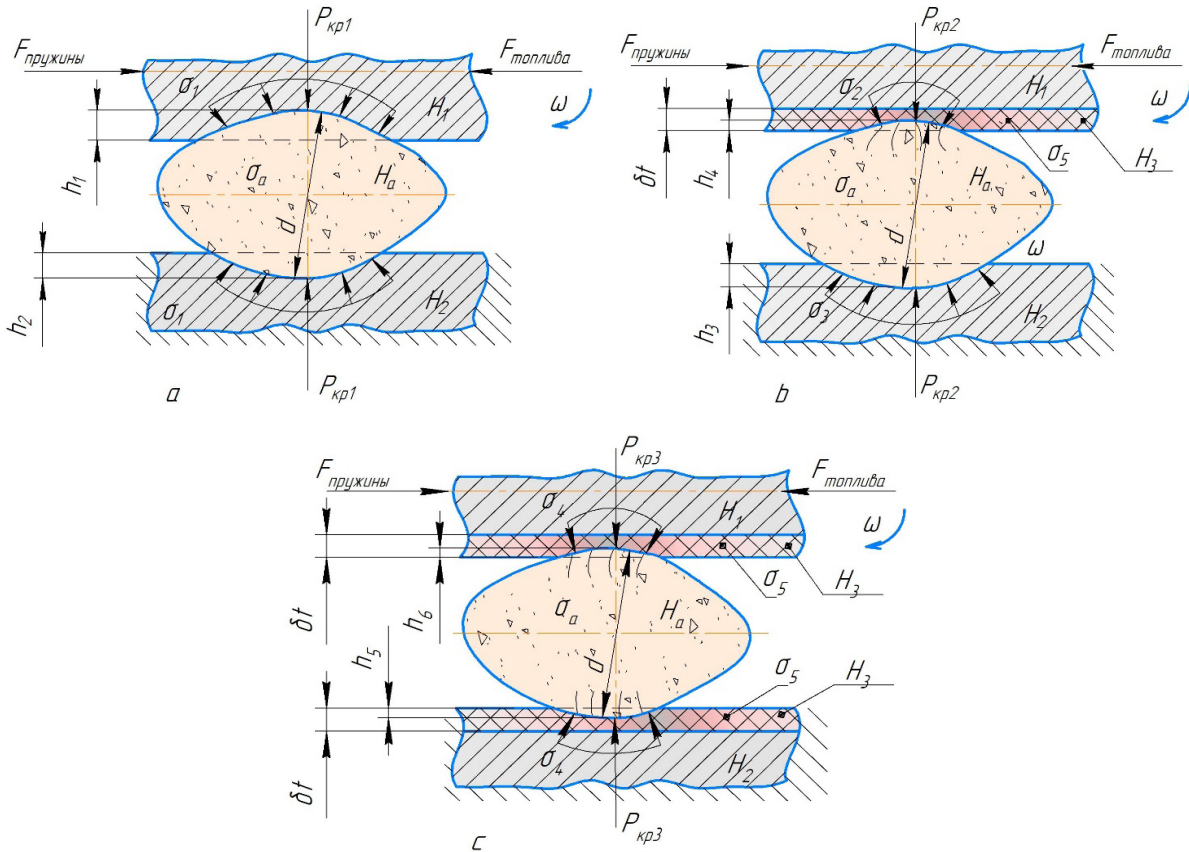


Рис. 1. Схемы контактно-абразивного изнашивания деталей:

a – взаимодействие абразива между неупрочненными поверхностями деталей;

b – взаимодействие абразива с рабочими поверхностями при упрочнении одной детали;

c – взаимодействие абразива с рабочими поверхностями при упрочнении двух деталей;

- $F_{пружины}, F_{топлива}$ – сила, приводящая в движение иглу распылителя, Н; ω – угловая скорость, s^{-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 – диаметр абразива, мкм; σ_{1-4} – напряжение в деталях, МПа;
- σ_5 – напряжение в покрытии, МПа; σ_a – напряжение в абразиве, МПа; δf – толщина покрытия, мкм;
- h_{1-6} – глубина отпечатка после разрушения абразива, мкм

Fig. 1. Diagrams of contact-abrasive wear of parts:

a – interaction of the abrasive material between non-reinforced surfaces of parts;

b – interaction of the abrasive material with working surfaces during hardening of one part;

c – interaction of the abrasive material with working surfaces during hardening of two parts;

- $F_{пружины}, F_{топлива}$ – force driving the nozzle needle, N; ω – angular velocity, s^{-1} ; $P_{кр1,2,3}$ – load on the abrasive material, N;
- $H_{1,2}$ – microhardness of parts, МПа; H_3 – coating microhardness, МПа; H_a – microhardness of the abrasive material, МПа;
- d – diameter of the abrasive material, microns; σ_{1-4} – stress in parts, МПа; σ_5 – stress in the coating, МПа;
- σ_a – stress in the abrasive material, МПа; δf – coating thickness, microns;
- h_{1-6} – depth of imprint after the destruction of the abrasive material, microns

⁵ Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: «Машиностроение», 1977. 526 с.

⁶ Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1978. 271 с.

Границы перехода находятся в пределах $K_T = 0,5 \dots 0,7$. При $K_T > 0,7$ происходит многоцикловое изнашивание.

Нижний предел микротвердости стальной поверхности в условиях абразивного изнашивания должен отвечать условию:

$$H_m \geq 0,7H_a. \quad (2)$$

Условие разрушения абразивной частицы и поверхности⁷ –

$$\frac{H_m}{H_a} = \frac{P_m}{P_a}, \quad (3)$$

где P_m и P_a – критические нагрузки для разрушения детали и абразива, Н.

Максимальное напряжение σ_{max} , при котором происходит разрушение абразива [3], –

$$\sigma_{max} = \frac{P_a}{S} = \frac{3P_a}{2\pi d^2} \geq [\sigma_a], \quad (4)$$

где S – площадь контакта абразива с продавливаемой поверхностью, мм²; d – диаметр абразива, мм; $[\sigma_a]$ – предел прочности абразива, МПа.

Критическую силу разрушения абразива в работе предложено определять из уравнения 4, как

$$P_a = \pi \cdot R^2 \cdot [\sigma_a]. \quad (5)$$

Для определения критической силы разрушения поверхности предложено выражение⁸:

$$P_m = \frac{8 \cdot G \cdot a^3}{3 \cdot R}, \quad (6)$$

где G – модуль сдвига, МПа; a – радиус контакта абразива с продавливаемой поверхностью, мм; R – радиус абразива, мм.

Модуль сдвига в общем случае определяется как⁸

$$G = \frac{E_c}{2 \cdot (1 + \mu_2)}; \quad (7)$$

для упрочненных деталей –

$$G = \frac{E_{np}}{2 \cdot (1 + \mu_2)}; \quad (8)$$

$$E_{np} = \frac{E_n \cdot (1 - \mu_3)}{(1 - 2\mu_2) \cdot (1 + \mu_1)}, \quad (9)$$

где E_c , E_{np} и E_n – модули упругости стали, приведенный для стали и покрытия, только для покрытия, МПа; μ_1 , μ_2 , μ_3 – коэффициенты Пуассона для абразива, покрытия и стали.

⁷ Казанцев С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: Дис. ... д-ра техн. наук / Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. Москва, 2006.

⁸ Сергеев В.З. Восстановление плунжерных пар топливных насосов распределительного типа диффузионным хромитированием: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1985. 220 с.

Согласно задаче Герца при вдавливании сферического индентора в упругое тело глубина отпечатка абразива после его разрушения составит⁹:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P_a(1 - \mu_2^2)R}{4E_{np}}}. \quad (10)$$

В случае упрочнения обеих деталей соединения отношение глубины вдавливания абразива в поверхности примет вид:

$$\frac{h}{R} = \frac{[\sigma_a]}{2H_m}. \quad (11)$$

Окончательно глубина вдавливания абразивной частицы в обе поверхности может определена по формуле:

$$h = \frac{R[\sigma_a]}{H_m}. \quad (12)$$

Таким образом, многоцикловое изнашивание происходит при высоком уровне твердости поверхностей деталей, при котором глубина внедрения абразивной частицы будет стремиться к минимуму $h \rightarrow 0$.

$$h = \frac{R[\sigma_a]}{0,7H_a}. \quad (13)$$

Из уравнения 6 следует, критическая (минимальная) толщина, обеспечивающая несущую способность упрочняющего покрытия:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot R \cdot P_a \cdot \gamma^3 \cdot (1 - \mu_2)}{4 \cdot E_{np}}}, \quad (14)$$

где γ – отношение глубины внедрения абразива к радиусу отпечатка $\gamma = h/a$. Из формулы 14 следует, что критическая толщина упрочняющего покрытия прямо пропорциональна размеру абразива. Чем меньше твердость покрытия, тем больше должна быть его толщина для сохранения несущей способности.

Таким образом, в данной работе на основании формул 5, 9, 10, 12, 13 и 14 получена новая зависимость для расчета критической толщины покрытия:

$$h_{кр} = f(H_m, R) =$$

$$\sqrt[3]{\frac{3 \cdot R \cdot P_a \cdot \left(\frac{R[\sigma_a]}{H_m} \right)^3 \cdot (1 - \mu_2)}{4 \cdot E_{np}}}. \quad (15)$$

Далее путем преобразования из выражения 15 получено:

$$h_{кр} = f(H_m, R) = R[\sigma_a] \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{H_m^3 \cdot (1 + \mu_2)}} = \frac{R[\sigma_a]}{H_m \cdot \sqrt[3]{(1 + \mu_2)}}. \quad (16)$$

⁹ Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.

Чистота поверхности упрочняемой детали зависит от толщины покрытия [4]. Для обеспечения адгезии перед осаждением покрытия необходимо обеспечить чистоту поверхности детали не менее $Ra = 0,32$ и $Rz = 2,6$ мкм. В начале осаждения карбидов хрома наблюдается эффект залечивания (заполнения) микронеровностей на поверхности детали. Поэтому шероховатость поверхности уменьшается до $Ra = 0,04$, $Rz = 0,2$ мкм.

Окончательно выражение для расчета критической толщины покрытия примет вид:

$$h_{кр} = f(H_m, R) = \frac{R[\sigma_a]}{H_m \cdot \sqrt[3]{(1+\mu_2)}} + Rz_{детали} + Rz_{покрытия} \cdot (17)$$

Поверхности деталей без покрытия разрушаются при меньших контактных напряжениях, чем упрочненные ($\sigma_4 \gg \sigma_1$). Глубина вдавливания абразива соотносится как $h_3 > h_1 \approx h_2 > h_4 \geq h_5 \approx h_6$ и пропорциональна площади контакта $S_3 > S_1 \approx S_2 > S_4 \geq S_5 \approx S_6$.

Нанесение карбидохромового покрытия на рабочие поверхности деталей распылителя ($P_{м1} > P_{м2} > P_{м3}$)

приводит к уменьшению удельных нагрузок и способствует разрушению абразива между ними, и в итоге – к повышению износостойкости прецизионной пары.

Выполнены расчеты по абразивному изнашиванию деталей распылителя форсунки на компонентах пыли, средняя концентрация которых в пылевом облаке Московской области составляет 78% для кварца и 10% для корунда. В таблице представлены результаты расчета коэффициента K_r .

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что упрочнение прецизионных деталей распылителя форсунки CVD-методом карбидохромовыми покрытиями до уровня микротвердости 18 ГПа обеспечивает высокую износостойкость в условиях абразивного изнашивания.

Изменение силы разрушения и критической толщины карбидохромового покрытия (18,9 ГПа) в зависимости от диаметра абразивных частиц представлено на рисунке 2. Установленная зависимость коррелирует с результатами работы [5], описывающей

Коэффициент K_r деталей распылителя на изнашиваемых поверхностях

Таблица

Coefficient K_r of sprayer parts on wearing surfaces

Table

Тип Type	Деталь / Поверхность Part / Surface	Материал Material	Микротвердость, ГПа Microhardness, GPa	Критерий оценки, K_r / Evaluation criterion, K_r	
				Кварц / Quartz	Корунд / Corundum
Серийные Serial	Корпус / Frame	12X2H4A	7,35	0,70...0,65	0,35...0,31
	Игла / Needle	P6M5	7,85	0,74...0,69	0,37...0,33
Упрочненные Reinforced	Покрытие / Coating	Cr_3C_2	12	1,14...1,06	0,57...0,50
			15	1,43...1,33	0,71...0,63
			18	1,71...1,59	0,85...0,75
			21	2,00...1,86	1,00...0,87
Абразив Abrasive	Кварц / Quartz	SiO_2	10,5...11,3	–	–
	Корунд / Corundum	Al_2O_3	21...24	–	–

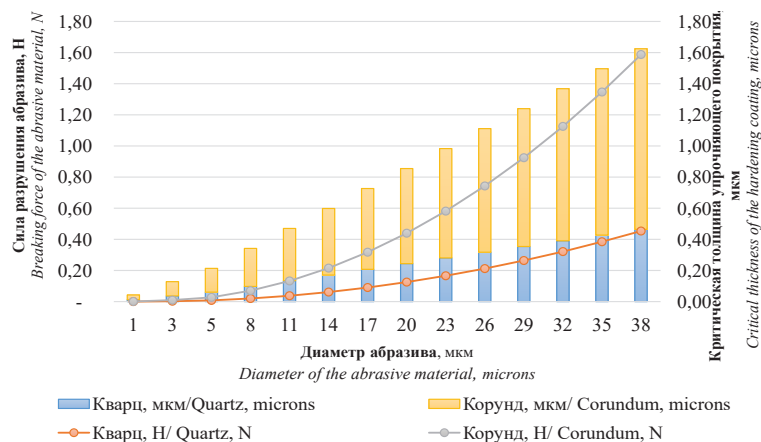


Рис. 2. Влияние размера абразива на величину разрушающей силы и критическую толщину карбидохромового покрытия (18,9 ГПа)

Fig. 2. Effect of abrasive size on the value of destructive force and critical thickness of chromium carbide coating (18.9 GPa)

измельчение частиц гранита в дробилках типа валковых, щековых, конусных и других видов.

Нами получены уравнения регрессии и графики функции отклика (рис. 3) для определения критической толщины покрытия в зависимости от уровня микротвердости и диаметра абразива.

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

$$h_{\text{Корунд}} = 0,46 - 6,55 \cdot 10^{-5} H_M + 0,065R + 2,05 \cdot 10^{-9} \cdot H_M^2 - 2,16 \cdot 10^{-6} \cdot H_M R - 6,92 \cdot 10^{-17} R^2. \quad (19)$$

Из уравнений 18 и 19 следует, что с увеличением размера абразива критическая толщина упрочняющего покрытия увеличивается. С увеличением

микротвердости критическая толщина упрочняющего покрытия уменьшается. Исходя из этого величина износа покрытий убывает по линейному закону, что согласуется с результатами работы [6].

Согласно расчетам карбидохромовое покрытие (18,9 ГПа) в условиях абразивного изнашивания деталей распылителя форсунки обеспечивает несущую способность при толщине не менее 3 мкм. Это согласуется с результатами, опубликованными в работе [7], согласно которым минимальная рекомендуемая толщина абразивостойкого покрытия составляет от 3 до 10 мкм. Для технологии восстановления геометрических параметров изношенных деталей распылителя толщина покрытия может быть увеличена с учетом величины износа.

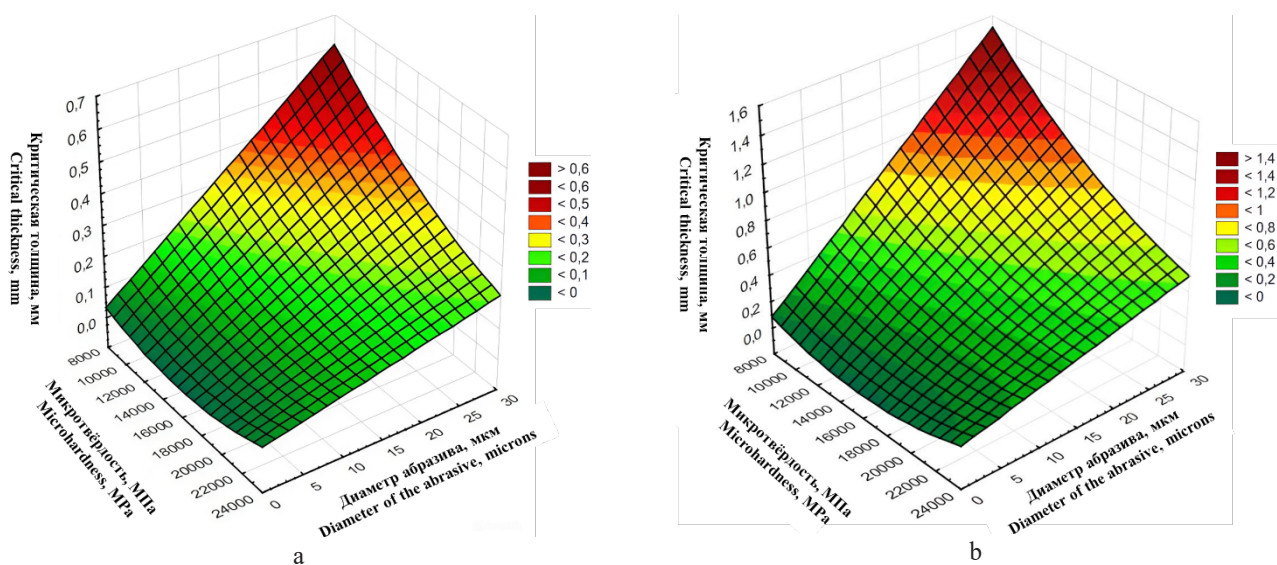


Рис. 3. Функция отклика критической толщины покрытия в зависимости от его микротвердости и размера абразива: (а) кварц; (б) корунд

Fig. 3. Response function of the critical coating thickness depending on its microhardness and the size of the abrasive material: (a) quartz; (b) corundum

Выводы

1. Получены аналитические зависимости для расчета критической толщины карбидохромового покрытия на рабочих поверхностях прецизионных деталей распылителя форсунки в условиях абразивного изнашивания.
2. Получены уравнения регрессии и графики функции отклика критической толщины покрытия

в зависимости от уровня микротвердости и размера частиц кварца и корунда.

3. Для обеспечения несущей способности упрочняющего покрытия на деталях распылителя форсунки дизельного двигателя его критическая толщина при микротвердости 18,9 ГПа должна составлять не менее 3 мкм.

Список источников

1. Логачев К.М. Модернизация CVD-установки для осаждения карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки дизельных двигателей // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 3. С. 84-90. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-84-90>
2. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Пастухов А.Г., Скороходов Д.М., Логачев К.М. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации

References

1. Logachev K.M. Upgrading a CVD unit for chrome carbide deposition on the inner surfaces of the fuel injector nozzle body of a diesel engine. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):84-90. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-84-90>
2. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Pastukhov A.G., Skorokhodov D.M., Logachev K.M. Deformation of precision parts in diesel fuel equipment during diffusion metallization. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(3):4-11. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11>

// Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 3. С. 4-11. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11>

3. Мещерякова А.Р., Горячева И.Г. Напряженное состояние упругих тел в условиях качения с проскальзыванием при наличии промежуточного слоя // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23, № 6. С. 91-101. EDN: HJKIJK

4. Бутенко В.И. Влияние начального состояния поверхностей деталей на технологическую совместимость создаваемых на них функциональных слоев и покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, № 9 (189). С. 394-400. EDN: SGYGDV

5. Гурьянов Г.А., Абдеев Б.М., Байгереев С.Р., Ким В.А., Сулейменов А.Д. Прикладная механико-математическая модель измельчения частицы твердого вещества статическим раздавливанием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2021. № 3. С. 58-69. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.3.06>

6. Сильченко О.Б., Силуянова М.В., Хопин П.Н. Исследование микротвердости и износостойкости карбометаллических покрытий из композиционных материалов, полученных газодетонационным методом // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 10 (95). С. 29-36. <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-10-29-36>

7. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review. *Lubricants*. 2014;2(2):66-89. <https://doi.org/10.3390/lubricants2020066>

5. Meshcheryakova A.R., Goryacheva I.G. Stress state of elastic bodies under slip-rolling contact in the presence of an intermediate layer. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2020;23(6):91-101. (In Russ.)

4. Butenko V.I. Effect of initial condition of parts surfaces on technological compatibility of functional layers and coatings created on them. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2020;16(9):394-400. (In Russ.)

5. Guryanov G.A., Abdeev B.M., Baigereyev S.R., Kim V.A., Suleimenov A.D. The applied mechanical and mathematical model of grinding of a solid particle by static crushing. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics = PNRPU mechanics bulletin*. 2021;3:58-69. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.3.06>

6. Silchenko O.B., Siluyanov M.V., Hopin P.N. Micro-hardness and wear-resistance investigation in carbo-metal coating composites obtained through gas-detonation method. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2020;10:29-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-10-29-36>

7. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review. *Lubricants*. 2014;2(2):66-89. <https://doi.org/10.3390/lubricants2020066>

Информация об авторах

Михаил Никитьевич Ерохин¹, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 572092705884

Сергей Павлович Казанцев², д-р техн. наук, профессор; kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>; Scopus Author ID: 57209268547; Researcher ID: GZL-6443-2022

Иван Юрьевич Игнаткин³, д-р техн. наук, профессор; ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>; Scopus Author ID: 57222543815; Researcher ID: AAC-1577-2022

Константин Михайлович Логачёв⁵, канд. техн. наук, ассистент; klogachyov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-3474-7591>, SPIN-код: 9152-5491, AuthorID: 1134974

Дмитрий Михайлович Скороходов⁵, канд. техн. наук, доцент; d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999; Researcher ID: AFH-8012-2022

^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

М.Н. Ерохин – разработка методологии исследования; С.П. Казанцев – руководство исследованием, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; И.Ю. Игнаткин – формирование выводов исследования; К.М. Логачёв – актуальность проблемы, формулирование основной концепции исследования, представление результатов; Д.М. Скороходов – визуализация, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 12.09.2024, после рецензирования и доработки 21.10.2024; принята к публикации 21.10.2024.

Author Information

Mikhail N. Erokhin¹, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>; Scopus Author ID: 572092705884

Sergey P. Kazantsev², DSc (Eng), Professor; kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>; Scopus Author ID: 57209268547; Researcher ID: GZL-6443-2022

Ivan Yu. Ignatkin³, DSc (Eng), Professor; ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>; Scopus Author ID: 57222543815; Researcher ID: AAC-1577-2022

Konstantin M. Logachev⁴, CSc (Eng), Assistant Professor, klogachyov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-3474-7591>, SPIN-код: 9152-5491, AuthorID: 1134974

Dmitry M. Skorokhodov⁵, CSc (Eng), Associate Professor; d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999

^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation

Author Contribution

M.N. Erokhin – research methodology; S.P. Kazantsev – research supervision, writing – finalizing (revising and editing) of the manuscript; I.Yu. Ignatkin – research conclusions; K.M. Logachev – problem statement, conceptualization, presentation of results; D.M. Skorokhodov – visualization, writing – finalizing (revising and editing) of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsibility for plagiarism

Received 12.09.2024; Revised 21.10.2024; Accepted 21.10.2024