

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-84-90



Модернизация CVD-установки для осаждения карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки дизельных двигателей

Константин Михайлович Логачёв, аспирант

klogachyov@mail.ru; SPIN-код: 9152-5491, AuthorID: 1134974

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Износ деталей распылителя форсунки происходит по причине попадания абразивных частиц кварца и оксида алюминия в топливо. Твёрдость кварцевого абразива превышает твёрдость рабочих поверхностей деталей в 1,4 раза, а у оксида алюминия превышение составляет 2,7 раза. Упрочнение одной из деталей распылителя не приводит к достаточному увеличению ресурса, поэтому необходимо упрочнять обе детали прецизионной пары. CVD-метод является наиболее перспективной технологией осаждения износостойких покрытий на стальных деталях машин. Он позволяет получать карбидохромовое покрытие с микротвёрдостью до 19 ГПа (в условиях вакуума 100...0,001 Па) при температурах более 200°C. Анализ имеющихся устройств и обзор патентов известных решений по формированию покрытия из паровой фазы показали невозможность использования этих устройств для восстановления корпуса распылителя. В связи с этим разработаны новая конструкция реактора и схема CVD-установки для осаждения покрытий на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя форсунки. Разработанная CVD-установка учитывает факторы, влияющие на осаждение карбида хрома: термодинамические условия, подача реактива, продолжительность осаждения, параметры установки, адгезия и свойства покрытия. Модернизация CVD-установки обеспечивает получение карбидохромового покрытия на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя форсунки, термодинамическое равновесие химической реакции разложения гексакарбонила хрома при температуре ниже 200°C (ниже уровня низкого отпуска сталей 18X2H4BA, 12X2H4A и 40XH2MA) и контролируемую подачу реакционной среды в труднодоступные зоны формирования покрытий тугоплавких металлов.

Ключевые слова: технология восстановления, корпус распылителя форсунки, гексакарбонил хрома, карбид хрома, осаждение, карбидохромовое покрытие, CVD-метод, модернизация CVD-установки, реактор, вакуум, термодинамические условия

Формат цитирования: Логачёв 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>.

© Логачёв К.М., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Upgrading a CVD unit for chrome carbide deposition on the inner surfaces of the fuel injector nozzle body of a diesel engine

Konstantin M. Logachev, postgraduate student

klogachyov@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. Fuel injector nozzle parts tend to wear out due to abrasive particles of quartz and aluminum oxide penetrating into the fuel. The hardness of quartz abrasive particles exceeds the hardness of work surfaces in 1.4 times, and that of aluminum oxide – in 2.7 times. Strengthening one part of the fuel injector nozzle does not increase the service life sufficiently, so it is necessary to harden both parts of the precision pair. The CVD method is the most promising technology of wear-resistant coating deposition on steel machine parts. It produces carbide-chrome coating with microhardness up to 19 GPa (in vacuum conditions of 100 to 0.001 Pa) at temperatures above 200°C. The analysis of available devices and the review of patents of known solutions on the coating deposition from a steam phase have

shown the impossibility of using these devices for restoration of the nozzle body. In this respect, the author developed a new reactor design and a scheme of the CVD unit for the coating deposition on the inner hard-to-reach surfaces of the nozzle body. The developed CVD unit takes into account the factors affecting chromium carbide deposition: thermodynamic conditions, reagent feed, deposition duration, unit parameters, adhesion and coating properties. The CVD unit upgrade results in making chromium carbide coating on the inner surfaces of the nozzle sprayer body, achieving thermodynamic equilibrium of chemical reaction of chromium hexacarbonyl decomposition at temperatures below 200°C (below the low tempering level of 18X2H4BA, 12X2H4A and 40XH2MA steel), and ensuring a controlled supply of a reaction medium to hard-to-reach areas, where refractory metal coatings are formed.

Keywords: reduction technology, fuel injector nozzle body, chromium hexacarbonyl, chromium carbide, deposition, carbidochrome coating, CVD-method, CVD-module upgrade, reactor, vacuum, thermodynamic conditions

For citation: 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 Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-84-90>.

Введение. К сельскохозяйственным машинам, работающим в тяжёлых условиях, предъявляются высокие требования, касающиеся их надёжности. Более 40% отказов дизелей обусловлено нарушением работы топливоподающей системы. Из общего числа отказов топливной аппаратуры на форсунку ДВС приходится 12%. Согласно проведенному мониторингу не менее 66% неисправностей форсунок автотракторных дизелей приходится на распылитель. В распылителе форсунки изнашиваются направляющие поверхности иглы и корпуса распылителя, уплотнительные их конусные поверхности и распыливающие отверстия [1].

В настоящее время применяется способ восстановления распылителей форсунок путём перекомпоновки, заключающейся в разборке, очистке, дефектовке, выведении следов износа и селективной подборке прецизионных пар. Способ позволяет восстанавливать не более 30% ремфонда распылителей. Кроме того, не решается проблема восстановления распыливающих отверстий.

Известна технология восстановления плунжерных пар топливных насосов высокого давления путём нанесения железоборидного покрытия на наиболее доступную деталь – плунжер. Технология позволяет увеличить ресурс плунжерной пары в 1,7 раза в сравнении с серийными¹.

Разработано большое количество высокотемпературных способов нанесения износостойких покрытий на изношенные прецизионные детали топливной аппаратуры. Нагрев выше 400°C приводит к отпуску применяемых сталей, релаксации внутренних напряжений, что при последующей закалке является причиной значительной деформации (коробления) деталей [2-3].

¹ Казанцев С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 32 с. EDN: NJYXMN

Технология восстановления распылителей форсунок дизелей диффузионным хромированием в вакууме рассмотрена в работе [3]. Осаждение карбида хрома методом контактного хромирования проводится при температуре 1220°C в течение 7 ч. При указанных выше недостатках перегрев деталей в течение длительного времени приводит также к росту зерна в стали.

Для сохранения твердости деталей распылителя и исключения повторной закалки температура процесса нанесения карбидохромового покрытия не должна превышать уровень низкого отпуска 200°C (табл.).

CVD-метод позволяет получать карбидохромовые покрытия при температуре 200°C и выше. Процесс осаждения карбида хрома при 200°C проходит нестабильно и не обеспечивает качество упрочняющего покрытия [4-6]. При температуре до 350...400°C осуществляется низкотемпературный режим формирования карбидохромового покрытия, который сопровождается эндотермичностью, вызывая колебание температуры подложки на 10...20°C, что приводит к формированию горизонтально-слоистой структуры износостойкого слоя с включениями примесей продуктов реакции разложения. Получить равномерную горизонтальную структуру покрытия можно при усиленном теплообмене между подложкой и нагревателем и регулировании количества подаваемого в реакционную камеру карбонила.

По нашему мнению, реализация указанных условий при температуре ниже 200°C возможна при поддержании усиленного теплообмена между подложкой и нагревателем с помощью индуктора, выполняющего функцию теплоаккумулятора. Кроме того, в установке для снижения температуры процесса осаждения и уменьшения количества примесей в покрытии необходимо производить осаждение при давлении вакуума 0,01...0,001 Па².

² Сыркин В.Г. CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. М.: Наука, 2000. 496 с.

Таблица

Механические свойства сталей деталей распылителя при повышенных температурах^{3,4}

Table

Mechanical properties of the steels of the fuel injector parts at increased temperatures

Деталь Part	Марка стали Steel	Закалка, °C / Hardening tempering, °C		Отпуск, °C Tempering, °C	Механические свойства / Mechanical properties	
		Температура нагрева Temperature	Охлаждающая среда Cooling medium		Температура, °C Temperature, °C	Твердость, HRC Hardness, HRC
Игла Spray Nozzle Needle	9XC	870	Масло Oil	180...240	200	64
					300	63
					400	59
					500	53
					550	50
					600	48
	P6M5	1220	Масло Oil	500...660	200	64
					300	63
					400	62
					500	61
					550	59
					600	57
	P18	1280	Масло Oil	400...600	200	64
					300	63
					400	62
					500	60
					550	58
					600	56
Корпус Spray nozzle body	18X2H4BA	860	Масло Oil	200...500	200	64
					300	63
					400	63
					500	62
					550	61
					600	60
	12X2H4A	790	Масло Oil	180...200	200	62
					300	61
					400	60
					500	58
					550	57
					600	55
	40XH2MA	840	Масло Oil	540...660	200	62
					300	61
					400	59
					500	54
					550	53
					600	49

³ Марочник сталей и сплавов / Сост. Ю.Г. Драгунов и др.; Под ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2015. 1215 с.

⁴ Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

Цель исследований: обоснование конструкции автоматизированной установки для осаждения износостойкого покрытия карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя форсунки ФД-22.

Материалы и методы. CVD-метод разложения металлоорганических соединений (МОС) на прецизионных поверхностях деталей распылителей форсунок позволяет восстанавливать геометрические размеры деталей путём образования на них износостойких покрытий. Анализ устройств, используемых для осаждения покрытий из паровой фазы, выявил их основные преимущества и недостатки.

Для создания условий образования карбидохромового покрытия термическим разложением гексакарбонила хрома $\text{Cr}(\text{CO})_6$ применён метод «Исикавы», определяющий причинно-следственную связь. Предложена конструкция установки для осаждения покрытий на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя форсунки включая направляющую поверхность и распыливающие отверстия.

Осаждение покрытия на наружные поверхности иглы распылителя проводили с помощью вращательного способа [7-10]. Для осаждения карбида хрома на внутренних поверхностях корпуса распылителя в данной работе предложена протяжка реакционной среды при неподвижном рабочем столе.

Результаты и их обсуждение. Патентный поиск и обзор литературы показали, что имеется большое количество зарубежных и отечественных CVD-установок по нанесению износостойких покрытий на стальные детали: *Easy Tube* (США); *SAMCO* (Япония); *VSE_PECVD_100* (Россия); *MOCVD* (Россия); и др. Упрочняющие покрытия

во всех случаях наносят из паровой фазы разложением карбониллов хрома, никеля, железа, вольфрама, ванадия, молибдена, кобальта и других металлоорганических соединений.

Недостатком всех устройств является невозможность осаждения равномерного покрытия на внутренние труднодоступные поверхности деталей – таких, как корпус распылителя форсунки, втулка плунжера ТНВД и др.

Напрямую подводить реакционную среду внутрь корпуса распылителя позволяет устройство [8]. Однако данное устройство не обеспечивает стабильную температуру внутренней поверхности, так как нагрев деталей осуществляется индукционным способом, при котором в поверхностных слоях металла возникают вихревые токи. Взаимодействие подложки с нерегулируемым объёмом реакционной среды приводит к охлаждению этой поверхности, что недопустимо. Кроме того, износостойкое покрытие формируется на всех доступных реакционной среде поверхностях.

Перед конструированием установки учитывались факторы^{5,6} [7, 10-13], влияющие на образование карбидохромового покрытия вследствие термического разложения гексакарбонила хрома и обуславливающие осаждение покрытия с требуемыми свойствами (рис. 1).

Установка должна осуществлять термодинамическое равновесие химической реакции разложения гексакарбонила хрома и обеспечивать контролируемую подачу реакционной среды в зону формирования покрытия. Подача реактива МОС в реактор влияет на продолжительность осаждения карбидохромового



Рис. 1. Факторы, влияющие на осаждение карбидохромового покрытия

Fig. 1. Factors affecting the deposition of a chromium carbide coating

⁵ Кострицкий А.И. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1991. 176 с.

⁶ Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 624 с.

покрытия. Регулирование концентрации паров МОС позволяет изменять скорость образования износостойких покрытий и влиять на их свойства. Сцепляемость покрытия с подложкой обеспечивается за счёт соответствующей подготовки поверхности⁴ [10-13]. Правильно подобранные материалы при изготовлении установки позволяют эксплуатировать её в течение долгого времени и получать качественные покрытия⁷. Таким образом, совокупность факторов определяет качество покрытия.

В соответствии с технологическими факторами разработаны новая конструкция реактора (рис. 2) и схема CVD-установки (рис. 3) для осаждения покрытий на внутренние труднодоступные поверхности корпуса распылителя форсунки.

Реактор 1 имеет форму прямоугольного параллелепипеда и оборудован муфтами 2, предназначенными для подачи и откачки инертного газа. В реактор 1 устанавливается монтажный стол 3, в котором содержится газоотвод 4, служащий для удаления продуктов разложения химической реакции из зоны осаждения покрытия. В монтажном столе 3 предусмотрена установочная площадка под индуктор с устанавливаемой в неё стеклотекстолитовой пластиной 5, предназначенной для снижения тепловых потерь.

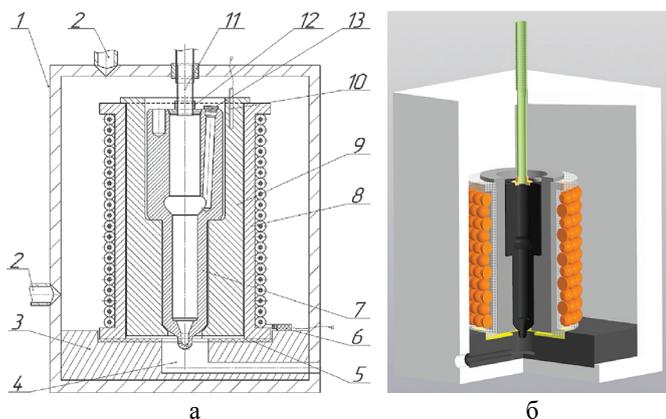


Рис. 2. Реактор для восстановления внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки (а – кинематическая схема, б – 3D модель):

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

Fig. 2. Reactor for restoring the inner surface of the fuel injector nozzle body (a – kinematic diagram of the reactor, b – 3D model of the reactor):

- 1 – reactor; 2 – coupling; 3 – mounting table; 4 – gas outlet;
- 5 – plate; 6 – terminal; 7 – fuel injector nozzle body;
- 8 – heater; 9 – support; 10 – thermocouple;
- 11 – telescopic tube; 12 – centering bushing; 13 – stopper

⁷ Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2007. 400 с.

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

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

К корпусу распылителя 7 подводится телескопическая трубка 11, по которой в процессе формирования износостойкого покрытия транспортируются пары металлорганических соединений. Телескопическая трубка 11, выполненная из жаростойкого

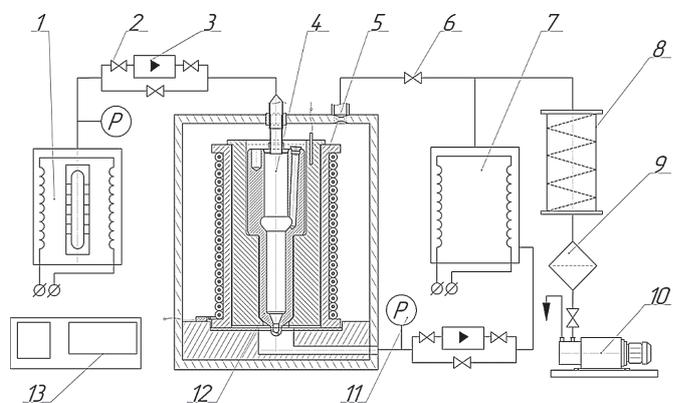


Рис. 3. CVD-установка для формирования износостойкого покрытия карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки:

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

Fig. 3. CVD-installation producing a wear-resistant coating of chromium carbide on the recoverable inner surface of the fuel injector nozzle body:

- 1 – sublimator; 2 – tap (valve); 3 – flow meter;
- 4 – reaction chamber; 5 – inductor; 6 – tap;
- 7 – decomposition furnace; 8 – cooler; 9 – filter;
- 10 – vacuum pump; 11 – pressure sensor; 12 – part;
- 13 – control and measuring station

полимера, центрируется с деталью 7 через переходную втулку 12, обеспечивая достаточную плотность прилегания втулки 12 к восстанавливаемой детали 7, что определяет равномерную подачу потока паров МОС на внутреннюю восстанавливаемую поверхность. Заглушка 13 устанавливается в топливопровод корпуса распылителя и выполняет функцию защиты от нерационального использования реактива.

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

Разработанный реактор является частью CVD-установки (рис. 3).

Устройство оснащено двумя расходомерами 3, предназначенными для управления режимом формирования покрытия. Первый расходомер 3, идущий после сублиматора 1 (рис. 3), определяет подачу МОС в реакционную камеру 4. Второй расходомер 3, расположенный за реактором, регулирует продолжительность химической реакции разложения и обеспечивает отвод продуктов разложения из реакционной камеры 4. Контроль за давлением вакуума в системе, паров МОС и продуктов разложения осуществляется вакуумметрами 11, расположенными на выходе из сублиматора 1 и реактора.

Устройство работает следующим образом. В сублиматор 1 загружается порошковый реактив гексакарбонила хрома $\text{Cr}(\text{CO})_6$. Открываются вентили 2 расходомеров 3. Открывается кран 6, идущий из реактора, предназначенный для ускоренного создания давления вакуума в реакторе. Включается вакуумный насос 10. На нихромовую нить подаётся ток для нагрева индуктора 5 и корпуса распылителя 12 до температур, установленных CVD-методом. Закрываются кран 2 сублиматора 1 и кран 6. Включается сублиматор 1. Открывается кран сублиматора 2. Пары гексакарбонила хрома (МОС) по трубопроводу подводятся в реакционную камеру 4 через расходомер 3. В месте соприкосновения паров с нагретой поверхностью металла корпуса распылителя 12 образуется покрытие, состоящее из карбидов хрома. Побочным продуктом химической реакции разложения МОС

является угарный газ CO . Он удаляется из реакционной камеры 4 с помощью вакуумного насоса 13 через расходомер 3, печь доразложения 7, в которой окисляется до CO_2 , и, проходя через охладитель 8 и фильтр 9, выбрасывается в атмосферу. Запрограммированная контрольно-измерительная станция 13 осуществляет контроль за нагревом индуктора и паров карбонила, давлением вакуума в установке и паров в сублиматоре, расходом карбонила.

Предлагаемое устройство при оснащении дополнительными сублиматорами, каждый из которых заполняется металлоорганическими соединениями, например, гексакарбонилами вольфрама, ванадия, молибдена, пентакарбонилем железа и тетракарбонилем никеля, позволяет формировать карбидные покрытия из этих соединений на внутренних поверхностях стальных деталей. Процесс получения карбидов вольфрама, ванадия, молибдена, железа и никеля является схожим с процессом получения карбида хрома.

Практическая значимость предлагаемого решения заключается в подводе реакционной среды вглубь отверстий (имеющих глубину больше размера диаметра в два и более раз) и в получении равномерной толщины покрытия на внутренних поверхностях. Разработанное устройство может быть использовано для упрочнения и восстановления деталей, к которым предъявляются требования высокой надёжности и долговечности. Предлагаемое устройство защищено патентом RU216021 U1 [14].

Выводы

1. Разработанная новая конструкция реактора и схема CVD-установки позволяют осаждать карбидохромовое покрытие на внутренних труднодоступных поверхностях корпуса распылителя форсунки.

2. Решена задача по обеспечению термодинамического равновесия химической реакции разложения гексакарбонила хрома при температуре ниже 200°C .

3. Модернизация CVD-установки и конструкция реактора обеспечивают контролируемую подачу реакционной среды в труднодоступные зоны формирования карбида хрома и других тугоплавких металлов.

4. Технический результат обеспечивается термодинамическим равновесием химической реакции разложения гексакарбонила хрома и контролируемой подачей реакционной среды в зону формирования покрытия.

Список использованных источников

1. Скороходов Д.М., Логачёв К.М. Влияние износа деталей распылителей форсунок на показатели автотракторных дизелей // Доклады ТСХА. 2021. Вып. 293. Ч. III. С. 377-380. EDN: PIWDRM
2. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Пастухов А.Г., Скороходов Д.М., Логачёв К.М. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 3. С. 4-11. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11>
3. Скороходов Д.М., Чеха О.В., Логачёв К.М. Анализ способов восстановления деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей // Научно-исследовательские публикации. 2022. № 3. С. 61-65. EDN: BUSYJY.
4. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Способы модифицирования поверхности трения деталей машин: Монография. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. 140 с. EDN: YOKZJR
5. Логачёв К.М. Обоснование выбора технологии восстановления прецизионных деталей распылителя форсунок дизельных двигателей // Студенчество России: век XXI: Материалы VIII Всероссийской молодёжной научно-практической конференции: В 3 ч. Ч. 2. Орёл, 15 декабря 2021 г. Орёл: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2022. С. 309-317. EDN: EYJZKW.
6. Устройство для нанесения износостойких покрытий на металлические изделия: Патент на полезную модель RU98193 U1, МПК C23C16/18 / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.]; № 2010114349/02; заявл. 13.04.2010; опубл. 10.10.2010. EDN LQMXXM.
7. Ерохин М.Н., Чупятов Н.Н. Износостойкость прецизионных деталей гидравлических систем, восстановленных карбидохромовым покрытием // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 3 (73). С. 41-45. EDN: WAGPKB.
8. Ерохин М.Н., Чупятов Н.Н. Повышение износостойкости прецизионных деталей гидравлических систем сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 3. С. 7-10. EDN: SIWALZ.
9. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Износостойкость карбидосодержащих хромовых покрытий, полученных из газовой фазы // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2017. № 5 (81). С. 48-53. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2017-5-48-53>
10. Ерохин М.Н., Плетнёв Л.В., Чупятов Н.Н. Управление процессом формирования карбидохромовых CVD-покрытий на внешней поверхности цилиндрической подложки // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 124, № 3. С. 26-34. EDN: WWRUIZ.
11. Zhang C., Du Y., Peng Y. and other Thermodynamic modeling of the C-CO-Mo and C-Mo-N ternary systems. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2016;37(4):423-437.
12. Hummel W., Mompean J. and other. Chemical thermodynamics of compounds and complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zr with selected organic ligands. Boston: Elsevier Science, 2005. 1133 p.
13. Douard A., Maury F., Jorcin J.B. Reactivity of Cr(CO)₆ in atmospheric pressure CVD processes for the growth of various metallurgical coatings. *Reviews on advanced materials science*. 2007;15 (1):24-32.
14. Устройство для формирования износостойкого покрытия из карбида хрома на восстанавливаемой внутренней поверхности корпуса распылителя форсунки: Патент на полезную модель RU216021 U1, МПК C23C16/32, C23C16/54. № 2022120149 / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Н.Н. Чупятов и др.; заявл. 22.07.2022; опубл. 13.01.2023. EDN: VLCYOM.

Автор несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023; поступила после рецензирования и доработки 06.04.2023; принята к публикации 06.04.2023

References

1. Skorokhodov D.M., Logachev K.M. Influence of wear of injector sprayer parts on the performance of autotractor diesel engines. *Doklady TSHA*. 2021;293; III:377-380. (In Rus.)
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 Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11>
3. Skorokhodov D.M., Chekha O.V., Logachev K.M. Analysis of ways to restore parts of fuel equipment of diesel engines. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii*. 2022;3:61-65. (In Rus.)
4. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Methods for modifying friction surfaces of machine parts: Monograph. Moscow, FGBOU VPO MGAU, 2014. 140 p.
5. Logachev K.M. Substantiation of technology selection for restoration of precision parts of the nozzle of injectors of diesel engines. *Studenchestvo Rossii: vek XXI: Materialy VIII Vserossiyskoy molodozhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: In three parts. Part 2. Orel, December 15, 2021* Orel: Orel State Agrarian University named after N.I. Parakhin. 2022:309-317. (In Rus.)
6. Suminov I.V., Epelfeld A.V., Lyudin V.B. et al. Device for applying wear-resistant coatings on metal products: patent RU98193 U1, IPC C23C16/18; No 2010114349/02, 2010. (In Rus.)
7. Erokhin M.N., Chupyatov N.N. Wear resistance of hydraulic system precision components restored with chromium carbide coating. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2016;3(73):41-45. (In Rus.)
8. Erokhin M.N., Chupyatov N.N. Improving the wear resistance of precision parts of hydraulic systems of agricultural machinery. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;3:7-10. (In Rus.)
9. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Wear-resistance of carbide-containing chrome coatings obtained from the gas phase *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2017;5(81):48-53. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2017-5-48-53>
10. Erokhin M.N., Pletnev L.V., Chupyatov N.N. Control of the process of formation of chromium carbide CVD coatings on the outer surface of a cylindrical substrate. *Proceedings of GOS-NITI*. 2016;124(3):26-34. (In Rus.)
11. Zhang C., Du Y., Peng Y. and other Thermodynamic modeling of the C-CO-Mo and C-Mo-N ternary systems. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2016;37 (4):423-437.
12. Hummel W., Mompean J. and other. Chemical thermodynamics of compounds and complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zr with selected organic ligands. Boston: Elsevier Science, 2005. 1133 p.
13. Douard A., Maury F., Jorcin J.B. Reactivity of Cr(CO)₆ in atmospheric pressure CVD processes for the growth of various metallurgical coatings. *Reviews on advanced materials science*. 2007;15(1):24-32.
14. Device for producing a wear-resistant coating of chromium carbide on the restored inner surface of the fuel injector nozzle body: Patent for utility model RU216021 U1, MPK C23C16/32, C23C16/54. № 2022120149, 2023. (In Rus.)

The author bears responsibility for plagiarism.

Received 07.03.2023; revised 06.04.2023; accepted 06.04.2023