

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**
**TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF
SHIPBUILDING PRODUCTION**

Научная статья

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.007>

**Повышение долговечности прецизионных деталей судовых дизелей
формированием композиционных покрытий на поверхности плунжера**

Л.Б. Леонтьев¹, leontyev.l.b@yandex.ru, А.Л. Леонтьев², gfi25leontev@mail.ru,
К.А. Молоков^{3,4}, spektrum011277@gmail.com

¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ²Правительство Приморского края,

³Дальневосточный федеральный университет (ДФУ);

⁴Владивостокский государственный университет (ВВГУ)

Аннотация. Основной причиной отказов плунжерных пар топливных насосов высокого давления (ТНВД) является потеря гидроплотности вследствие увеличения зазора между плунжером и втулкой из-за абразивного изнашивания сопряженных поверхностей трения, а также эрозионного и коррозионного изнашивания. Для восстановления изношенных и повышения долговечности плунжерных пар ТНВД необходимо разработать технологию формирования износостойких покрытий. Наиболее перспективным направлением восстановления и повышения износостойкости является формирование металлокерамических композиционных покрытий на основе гальванического хрома.

Основной целью работы является определение оптимальных механических свойств композиционного покрытия на основе гальванического хрома и состава органо-неорганического материала для его модифицирования, обеспечивающих максимальную износостойкость и долговечность прецизионных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей. Проведенные исследования позволили установить, что формирование композиционного покрытия на основе гальванического хрома на плунжере позволяет повысить долговечность плунжерной пары по сравнению с хромированным плунжером более чем в три раза при использовании большинства органо-неорганических материалов.

Наиболее высокую износостойкость прецизионных деталей и соответственно их долговечность обеспечивает формирование покрытия на основе гальванического хрома с последующим его модифицированием вермикулитом, модифицированным хитозаном. Установлено, что наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ (втулка) оказывает коэффициент трения, меньшее – модуль упругости покрытия. Минимальное влияние оказывает величина упругого восстановления покрытия. Микротвердость покрытия практически не оказывает влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ в данном диапазоне величин. Модифицирование гальванического хрома органо-неорганическими материалами позволяет существенно уменьшить коэффициент трения в плунжерной паре.

Высокое содержание углерода, кремния, алюминия и марганца в поверхностном слое свидетельствует об образовании износостойкого металлокерамического покрытия.

Ключевые слова: плунжерная пара, плунжер, покрытие, органо-минеральные материалы, формирование, механические характеристики, износостойкость, долговечность, наноиндентирование.

Для цитирования Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Молоков К.А. Повышение долговечности прецизионных деталей судовых дизелей формированием композиционных покрытий на поверхности плунжера. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 73—80. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.007

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.007>

**Increasing the durability of precision parts of marine diesel engines by forming
composite coatings on the surface of the plunger**

Lev B. Leont'ev¹, Andrey L. Leont'ev², Konstantin A. Molokov^{3,4}

¹Marine State University named after adm. G.I. Nevelskoy, ²Primorsky Territory Government, ³Far Eastern Federal University (FEFU); ⁴Far Eastern State University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The main reason for the failures of plunger pairs of high-pressure fuel pumps (injection pumps) is the loss of hydraulic density due to an increase in the gap between the plunger and the sleeve due to abrasive wear of the mating friction surfaces, as well as erosive and corrosive wear. To restore worn-out and increase the durability of plunger pairs of injection pumps, it is necessary to develop a technology for the formation of wear-resistant coatings. The most promising direction of restoration and improvement of wear resistance is the formation of metal-ceramic composite coatings based on galvanic chromium. The main purpose of the work is to determine the optimal mechanical properties

of a composite coating based on galvanic chromium and the composition of organo- inorganic material for its modification, ensuring maximum wear resistance and durability of precision parts of the fuel equipment of marine diesel engines.

The conducted studies have allowed us to establish that the formation of a composite coating based on electroplated chromium on the plunger makes it possible to increase the durability of the plunger pair in comparison with the chrome plunger by more than three times when using most organo-inorganic materials. The highest wear resistance of precision parts and, accordingly, their durability is ensured by the formation of a coating based on galvanic chromium, followed by its modification with vermiculite modified with chitosan. It is established that the coefficient of friction has the greatest influence on the wear rate of the coating of the plunger and the steel of the plunger bushing, the modulus of elasticity of the coating has the lesser. The amount of elastic recovery of the coating has a minimal effect. The microhardness of the coating has practically no effect on the wear rate of the coating of the plunger and plunger bushing in this range of values. Modification of electroplated chromium with organo-inorganic materials can significantly reduce the coefficient of friction in the plunger pair. The high content of carbon, silicon, aluminum and manganese in the surface layer indicates the formation of a wear-resistant metal-ceramic coating.

Keywords: plunger pair, plunger, coating, organomineral materials, formation, mechanical characteristics, wear resistance, durability, nanoindentation

For citation: Lev B. Leont'ev, Andrey L. Leont'ev, Konstantin A. Molokov. Increasing the durability of precision parts of marine diesel engines by forming composite coatings on the surface of the plunger. 2023. № 1 part 1, P. 73—80. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.007

Введение

Современные судовые дизеля характеризуются усложнением их конструкций, повышением удельной мощности и тепловых и механических напряжений, что приводит к уменьшению их долговечности. Прецизионные детали топливной аппаратуры являются одними из наиболее ответственных и наименее долговечных узлов топливной аппаратуры судовых дизелей. Экономичность и надежность судовых дизелей в значительной степени зависит от технического состояния топливной аппаратуры. При эксплуатации дизелей происходит износ прецизионных пар: «плунжер – втулка» топливного насоса и «игла – корпус распылителя» форсунки. Износ этих деталей приводит к увеличению зазоров в сопряжении, и как следствие — к увеличению протечек топлива и повышенному расходу топлива, а также к неравномерной подаче топлива по цилиндрам и, как следствие, нагрузке на основные детали цилиндра-поршневой группы распределяются неравномерно, происходит повышенный их износ, что приводит к снижению долговечности, мощности, а порой и к аварии дизеля [1].

Основной причиной отказов плунжерных пар топливных насосов высокого давления (ТНВД) является потеря гидроплотности вследствие увеличения зазора между плунжером и втулкой из-за абразивного изнашивания сопряженных поверхностей трения, а также эрозионного и коррозионного изнашивания [1, 2].

Обеспечение эффективной работы ремонтных предприятий в условиях рыночной экономики, повышение уровня их производства зависит от сохранения конкурентных характеристик, поэтому наблюдается постоянное совершенствование технологии ремонта плунжерных пар ТНВД судовых двигателей. Наиболее широкое применение для восстановления плунжерных, обеспечивающих также повышение их ресурса, является электролитическое пористое хромирование [1, 3], реже применяются диффузионное хромирование [2] и диффузионная металлизация [4]. Эксплуатация прецизионных деталей, восстановленных нанесением гальванического хрома, показала их довольно высокую надежность [1]. Для

восстановления и упрочнения прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей также используют серпентинит, в этом случае снижаются коэффициент трения, параметры шероховатости поверхности и повышаются противозадирные свойства пары трения [5].

Необходимо также учитывать, что в настоящее время доля стоимости иностранных комплектующих в структуре стоимости судового оборудования составляет для гражданского сектора от 40 до 85 % [6], а большинство судовых дизелей иностранной постройки.

Для повышения долговечности трибосопряжений, работающих в условиях абразивного изнашивания, многие авторы рекомендуют повышать твердость поверхностных слоев деталей. В работе М.М. Хрущева и М.А. Бабичева [7] показано, что твердость материалов, зависящая от энергии связей в кристаллической решетке, в значительной мере определяет сопротивление материалов абразивному изнашиванию (при твердости абразива, намного превышающей твердость изнашиваемого материала). Если же твердость материала близка к твердости абразивных частиц или тем более превышает ее, износостойкость возрастает. Как правило, способность к схватыванию и масштаб вызываемых им повреждений также снижаются с увеличением твердости [8]. Таким образом, повышение твердости приводит к повышению сопротивления при абразивном изнашивании и противозадирных характеристик сопряжения [9].

Износостойкость трибосопряжения определяется как физическими параметрами процесса, так и в значительной степени механическими свойствами поверхностного слоя поверхности трения. Так как на физические параметры процесса изнашивания нет возможности оказывать существенное влияние, управлять этим процессом можно путем получения оптимальных параметров механических и триботехнических свойств износостойких покрытий. Для этого необходимо получить количественные или качественные зависимости износостойкости материалов покрытий от их эксплуатационных свойств.

Для повышения долговечности плунжерных пар ТНВД необходимо определить оптимальный диапазон механических и триботехнических

характеристик износостойких покрытий и разработать технологию их формирования. Наиболее перспективным направлением повышения износостойкости является формирование металллокерамических композиционных покрытий.

В настоящее время для повышения износостойкости деталей трибоузлов применяют модифицирование поверхностей трения органо-минеральными материалами с целью уменьшения коэффициента трения и увеличения поверхностной твердости, которые способны формировать защитные металллокерамические пленки толщиной 2–5 мкм, содержащие в большом количестве Si, Al, O, C в алмазоподобной фазе [1, 5, 10, 11].

Для восстановления и упрочнения прецизионных деталей судовых дизелей вследствие значительного износа в районе нагнетательной кромки плунжера и местных износов в районах наполнительного и отсечного отверстий втулки (зазор в верхней части плунжерной пары находится в пределах 25–40 мкм, но может достигать 260 мкм) используют пористое хромирование. Однако износостойкость хрома недостаточна для обеспечения заданного ресурса деталей. Для увеличения ресурса перспективно применение композиционных покрытий хром + металллокерамика, которые позволяют снизить коэффициент трения и повысить износостойкость трибосопряжения [1]. При этом толщина слоя в композиционном покрытии может составлять несколько микрометров. В этом случае наиболее точным методом оценки механических свойств является наноиндентирование [12, 13].

Цель работы – определение оптимальных механических свойств композиционного покрытия на основе гальванического хрома и состава органо-неорганического материала для его модифицирования, обеспечивающих максимальную износостойкость и долговечность прецизионных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей.

1. Материалы и методы исследования

Формирование покрытий на образцах из стали ХВГ проводили в следующей последовательности: сначала наносили хром толщиной 15–20 мкм гальваническим методом на режимах, обеспечивающих получение пористого покрытия, затем модифицировали органо-неорганическими материалами: серпентинитом; вермикулитом, композициями и композитами на их основе фрикционно-механическим способом [1].

Серпентинит, который применялся для исследований, имел брутто-формулу: $4.5\text{MgO} \cdot 0.7\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0.3\text{CaO} \cdot 0.2\text{MnO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Состав вермикулита имел брутто-формулу: $\text{Mg} \cdot \text{Fe}_{0.8} \cdot \text{Al}_{0.4} \cdot \text{Si}_{2.1}\text{O}_9 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot (\text{CaSiO}_3)_{0.9}$.

Хитозан представляет собой природный полисахарид, содержащий 41,8 % углерода, 7,5 % азота и 8,8 % воды. Брутто-формула хитозана $(\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4\text{NH}_2)_n$.

Исследования триботехнических свойств покрытий проводили на универсальной машине трения модели УМТВК по схеме «ролик–ролик» при постоянной скорости скольжения 0,71 м/с. Для триботехнических испытаний образцы изготавливали из стали ХВГ в форме роликов диаметром 45 мм, шириной 10 мм. Перед проведением испытаний

образцы полировали алмазной пастой до $Ra \leq 0,063$ мкм. В качестве неподвижного образца использовался ролик из стали ХВГ твердостью 60–61 HRC. Время испытаний каждой пары трения составляло четыре часа. Нагрузка изменялась от 100 до 500 Н. Испытания проводили с искусственным загрязнителем в смазке. В качестве искусственного загрязнителя использовалась кварцевая пыль дисперсностью 1–5 мкм. Концентрация загрязнителя в топливе составляла 1%. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (50–55 капель в минуту). Для смазки применялось дизельное топливо марки Л-0,5 по ГОСТ 305-2013.

Для исследования механических свойств покрытий на наноуровне использовали ультрамикротестер для динамических испытаний твердости материалов DUN-211S фирмы Shimadzu (Япония). Прибор предназначен для измерения твердости, модуля упругости и упругого восстановления по методу наноиндентирования. Испытания соответствуют стандарту ISO 14577-4:2016. Испытания проводили на режиме, обеспечивающем примерно постоянную глубину остаточного отпечатка при максимальной нагрузке на индентор, при этом величина нагрузки несколько отличалась по величине. Величину упругого восстановления покрытий определяли по формуле [12, 13]:

$$W_e = \frac{(h_{\max} - h_r)}{h_{\max}}$$

где h_r – глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки; h_{\max} – максимальная глубина отпечатка при максимальной нагрузке P_{\max} .

2. Результаты исследования их обсуждение

Исследования механических свойств стали ХВГ и покрытий методом наноиндентирования позволили установить следующее.

Величины микротвердости и модуля упругости стали и покрытий зависят от максимальной глубины отпечатка, причем увеличение глубины до 1,5 мкм и более приводит к существенному уменьшению величин микротвердости и модуля упругости (табл. 1). Поэтому для анализа влияния параметров механических свойств на триботехнические свойства была выбрана глубина $\leq 0,9$ мкм, обеспечивающая определение свойств поверхностных слоев, непосредственно влияющих на процесс трения и изнашивания.

Модуль упругости стали ХВГ не изменяется в процессе трения. Микротвердость поверхностного слоя в процессе триботехнических испытаний возрастает: при трении в паре с гальваническим хромом с 637 HV до 709 HV (на 11,3 %), а при трении с хромом, модифицированным органо-неорганическими материалами, увеличивается до 828 HV (на 16,8 % по сравнению с исходной микротвердостью). Модифицирование хрома органо-неорганическими материалами проводили после его нанесения на сталь на оптимальном режиме (плотность тока 60 А, температура электролита 50 °С).

Механические свойства гальванического хрома существенно зависят от параметров процесса его нанесения (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства стали ХВГ и износостойких покрытий

Состав покрытия	Нагрузка на индентор P_{max} , мН	Глубина остаточного отпечатка при максимальной нагрузке на индентор h_p , мкм	Модуль упругости покрытия $E \times 10^5$, МПа	Микротвердость, HV	Величина упругого восстановления покрытия W_e
Сталь ХВГ после шлифования	<u>166–172</u> 169	<u>0,920–0,934</u> 0,927	<u>2,01–2,08</u> 2,05	<u>613–655</u> 637	0,216
	<u>587–597</u> 594	<u>1,678–1,724</u> 1,696	<u>1,71–1,74</u> 1,72	<u>595–623</u> 609	0,270
Сталь ХВГ после испытаний в паре трения с гальваническим хромом	<u>176–197</u> 185	<u>0,892–0,909</u> 0,903	<u>2,00–2,09</u> 2,05	<u>693–726</u> 709	0,227
	<u>567–620</u> 594	<u>1,659–1,692</u> 1,676	<u>1,75–1,86</u> 1,80	<u>676–693</u> 684	0,284
Сталь ХВГ после испытаний в паре трения с хромом, упрочненным композицией 90% серпентинита + 10% вермикулита	<u>196–208</u> 202	<u>0,858–0,866</u> 0,862	<u>1,99–2,01</u> 2,00	<u>804–850</u> 828	0,275
Хром (режим хромирования: плотность тока 60 А, температура электролита 50 °С – оптимальный режим)	<u>249–294</u> 246	<u>0,762–0,782</u> 0,770	<u>2,23–2,54</u> 2,40	<u>982–1080</u> 1043	0,387
	<u>734–853</u> 798	<u>1,476–1,529</u> 1,497	<u>1,69–1,87</u> 1,77	<u>855–1069</u> 965	0,430
	<u>1285–1444</u> 1368	<u>2,298–2,331</u> 2,309	<u>1,38–1,50</u> 1,43	<u>816–866</u> 837	0,350
Хром (режим хромирования плотность тока 60 А, температура электролита 58 °С)	<u>306–352</u> 329	<u>0,722–0,752</u> 0,737	<u>2,45–2,72</u> 2,56	<u>970–1018</u> 994	0,419
Хром + серпентинит	<u>241–280</u> 260	<u>0,783–0,816</u> 0,800	<u>2,14–2,51</u> 2,33	<u>1118–1213</u> 1166	0,386
Хром + композит серпентинит + хитозан	<u>204–253</u> 229	<u>0,744–0,785</u> 0,767	<u>1,68–1,98</u> 1,82	<u>1091–1106</u> 1098	0,419
Хром + вермикулит	<u>249–271</u> 260	<u>0,794–0,799</u> 0,797	<u>2,17–2,46</u> 2,32	<u>1065–1116</u> 1087	0,403
Хром + вермикулит, модифицированный HCl	<u>243–266</u> 257	<u>0,777–0,796</u> 0,786	<u>2,06–2,18</u> 2,12	<u>1006–1074</u> 1042	0,450
Хром + композит вермикулит + хитозан	<u>237–264</u> 250	<u>0,782–0,795</u> 0,789	<u>1,86–2,06</u> 1,95	<u>995–1069</u> 1032	0,409
Хром + композиция 90% серпентинита + 10% вермикулита	<u>250–260</u> 256	<u>0,782–0,805</u> 0,794	<u>2,05–2,42</u> 2,26	<u>1085–1167</u> 1137	0,356
	<u>733–820</u> 775	<u>1,507–1,549</u> 1,525	<u>1,69–1,83</u> 1,75	<u>942–1030</u> 998	0,370
	<u>1281–1390</u> 1338	<u>2,338–2,421</u> 2,382	<u>1,43–1,48</u> 1,46	<u>798–852</u> 823	0,341
Хром + композиция 80% серпентинита + 20% вермикулита (61)	<u>227–260</u> 243	<u>0,797–0,836</u> 0,816	<u>2,15–2,33</u> 2,22	<u>999–1126</u> 1057	0,335
Хром + композиция 90% серпентинита + композит (10% вермикулита + хитозан)	<u>238–255</u> 248	<u>0,768–0,791</u> 0,783	<u>2,03–2,16</u> 2,11	<u>1034–1101</u> 1067	0,423
	<u>574–594</u> 584	<u>1,537–1,557</u> 1,547	<u>1,22–1,32</u> 1,27	<u>938–990</u> 964	0,402
Примечание. В числителе приведен диапазон изменения величины параметра, в знаменателе – среднее значение семи измерений.					

Модифицирование хрома органо-неорганическими материалами проводили после его нанесения на сталь на оптимальном режиме и позволяет уменьшить модуль упругости и увеличить

микротвердость покрытия. Наибольшая величина твердости покрытия характерна для хрома, упрочненного серпентинитом (1166 HV) и композицией 90% серпентинита + 10% вермикулита

(1137 HV), наименьшая — при упрочнении хрома вермикулитом, модифицированным хитозаном (1032 HV).

Модифицирование органо-неорганических материалов хитозаном приводит к незначительному уменьшению микротвердости и существенному снижению модуля упругости покрытия (табл. 1).

Сталь ХВГ характеризуется низкой величиной упругого восстановления покрытия.

Величина упругого восстановления гальванического хрома зависит от параметров процесса его нанесения (табл. 1). Модифицирование хромового покрытия органо-неорганическими

материалами влияет на величину упругого восстановления.

Наибольшее влияние модифицирование хромового покрытия органо-неорганическими материалами оказывает на уменьшение величин коэффициента трения и скоростей изнашивания плунжера и втулки. Формирование композитного покрытия на основе гальванического хрома позволяет повысить долговечность плунжерной пары по сравнению с хромированным плунжером более чем в три раза при использовании большинства органо-неорганических материалов (табл. 2).

Таблица 2

Механические и триботехнические свойства износостойких покрытий

Триботехнический материал для модифицирования гальванического хрома	Модуль упругости покрытия $E \times 10^5$, МПа	Микротвердость H , HV	Величина упругого восстановления покрытия W_n	Коэффициент трения, k_t	Скорость изнашивания покрытия плунжера мг/ч	Скорость изнашивания втулки, мг/ч	Суммарная скорость изнашивания пары трения, мм/ч
Сталь ХВГ	2,05	637	0,216	-	-	-	-
Хром (оптимальный режим хромирования: плотность тока 60 А, температура электролита 50 °С)	2,40	1043	0,387	0,209	1,8	7,2	9,0
Хром (режим хромирования: плотность тока 60 А, температура электролита 58 °С)	2,56	994	0,419	0,205	2,0	7,9	10,0
Серпентинит	2,33	1166	0,386	0,125	0,9	1,9	2,8
Серпентинит, модифицированный хитозаном	1,82	1098	0,389	0,142	0,5	1,8	2,3
Вермикулит	2,32	1087	0,403	0,166	1,4	3,2	4,6
Вермикулит, модифицированный соляной кислотой	2,12	1042	0,450	0,130	0,4	2,4	2,8
Вермикулит, модифицированный хитозаном	1,95	1032	0,409	0,128	0,2	2,3	2,5
Композиция 90% серпентинита + 10% вермикулита	2,26	1137	0,356	0,135	0,6	2,1	2,7
Композиция 80% серпентинита + 20% вермикулита	2,22	1057	0,355	0,134	0,5	2,5	3,0
Композиция 90% серпентинита + 10% вермикулита, модифицированного хитозаном	2,11	1067	0,423	0,122	0,3	2,0	2,3

Для оценки влияния механических свойств покрытия и коэффициента трения на износостойкость трибосопрежения «плунжер – втулка» ТНВД необходимо получить математические зависимости. Обработка результатов исследования (табл. 2) позволила установить зависимости скорости изнашивания сопряженных поверхностей от механических свойств покрытия и коэффициента трения:

– покрытия плунжера ($R^2 = 0,88$):

$$V_n = -2,596 + 0,742 \times 10^{-5} E - 1,51 W_e + 16,86 k_t;$$

– втулки плунжерной пары ($R^2 = 0,87$):

$$V_c = 0,465 + 3,04 \times 10^{-5} E - 9,8 \times 10^{-3} HV + 1,12 W_e + 42,015 k_t.$$

Достаточно высокий коэффициент корреляции позволяет анализировать влияние исследуемых параметров на скорости изнашивания покрытия плунжера и сопряженной стали ХВГ, но указывает на то, что имеются еще факторы, влияющие на процесс изнашивания (например, топография поверхности трения, химический состав и структура покрытия и др.) однако их влиянием можно пренебречь ввиду незначительного влияния или косвенного влияния на коэффициент трения.

Анализ зависимостей и рис. 1, а и б позволил установить, что наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ (втулка) оказывают коэффициент трения, меньшее –

модуль упругости покрытия, меньшее влияние оказывает величина упругого восстановления покрытия. Микротвердость покрытия практически не оказывает влияния на скорость изнашивания плунжера и незначительно снижает скорость изнашивания стали ХВГ в данном диапазоне величин.

Наиболее высокую износостойкость прецизионных деталей и соответственно их долговечность обеспечивает формирование покрытия на основе гальванического хрома с последующим его модифицированием вермикулитом, модифицированным хитозаном.

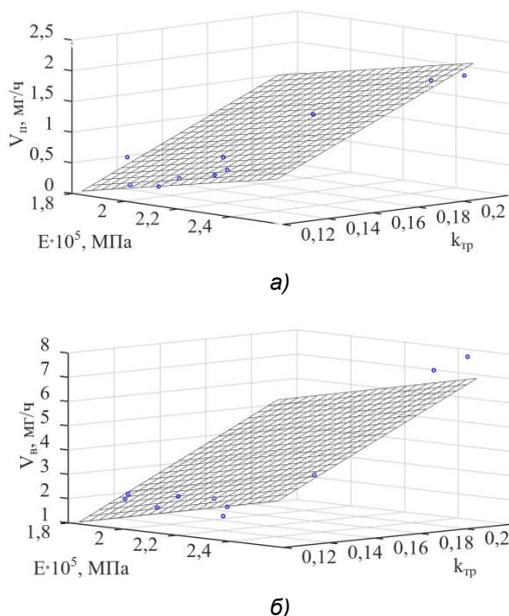


Рис. 1. Влияние модуля упругости покрытия плунжера и коэффициента трения на скорости изнашивания плунжера (а) и втулки (б)

Таким образом, для обеспечения максимальной долговечности плунжерных пар необходимо на поверхности плунжера формировать композиционное покрытие на основе хрома с последующей его модификацией органо-неорганическими материалами модифицированными хитозаном, который обеспечивает получение минимальных величин коэффициента трения и модуля упругости покрытия.

Для анализа влияния модифицирования хрома органо-неорганическими материалами на структуру покрытия были проведены металлографические исследования позволившие установить, что осадки хрома характеризуются наличием на поверхности сетки микротрещин и пор, которые соединяются между собой, образуя дорожки (рис. 2а). Модифицирование поверхности хромовых осадков органо-неорганическими материалами приводит к образованию композиционного покрытия, которое заполняет поры и впадины между вершинами кристаллитов хрома. При этом дефекты на поверхности хрома в виде пор и микротрещин «залечиваются», вследствие этого линия от наружной поверхности на микрошлифе становится четкой и ровной (рис. 2, б).

Исследование композиционных покрытий с помощью рентгено-электронной спектроскопии позволило установить состав металлокерамической

пленки на глубине до 100 нм. В зависимости от применяемого материала для модифицирования хромового покрытия поверхностный слой имеет следующий состав (в атомных процентах):

– при упрочнении хрома вермикулитом, модифицированным хитозаном: C = 29.91, O = 21.64, Al = 16.39, Cr = 20.20, Si = 8.61, Na = 0.87, Fe = 2.38;

– при упрочнении хрома серпентинитом: C = 47.60, O = 22.93, Cr = 18.35, Na = 2.31, Si = 3.47, Mn = 1.95, Fe = 1.85, Al = 1.54;

– при упрочнении хрома композицией 90% серпентинита + 10% хитозана: C = 57.12, O = 22.03, Al = 9.04, Cr = 3.85, Si = 3.27, Ca = 2.31, Fe = 1.85;

– при упрочнении хрома композицией 90% серпентинита + 10% вермикулита, модифицированного хитозаном: C = 56.23, O = 21.83, Cr = 10.89, Si = 3.78, Al = 4.93, Na = 1.78, Mn = 0.33, Fe = 0.23;

– при упрочнении хрома серпентинитом, модифицированным хитозаном: C = 58.20, Cr = 10.85, O = 21.83, Si = 3.72, Na = 1.78, Al = 1.37, Fe = 1.15, Mn = 1.10.

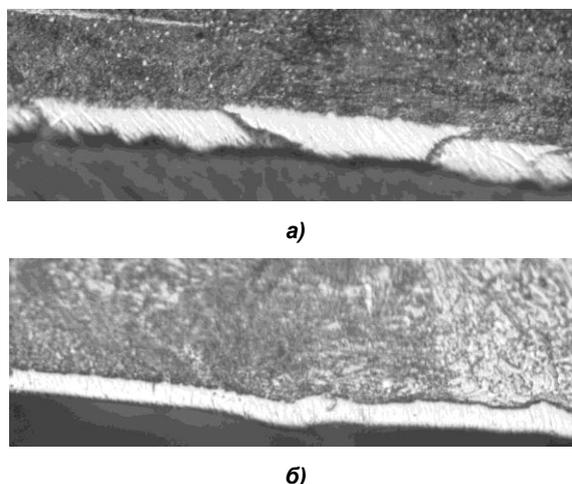


Рис. 2. Микроструктура износостойких покрытий: а – гальванического хрома толщиной 15 мкм (х500); б – гальванического хрома толщиной 15 мкм, упрочненного композицией 90% серпентинита + 10% вермикулита, модифицированного хитозаном (х500)

Исследование композиционных покрытий с помощью рентгено-флуоресценции на глубине свыше 100 нм после упрочнения хрома композициями на основе серпентинита позволило установить состав (средняя величина в атомных процентах): Cr = 98.10, Mn = 1.12, Si = 0.61, Fe = 0.17.

Высокое содержание углерода, кремния, алюминия и марганца в поверхностном слое свидетельствует об образовании износостойкого металлокерамического покрытия.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить.

1. Формирование композиционного металлокерамического покрытия на основе гальванического хрома на плунжере позволяет повысить долговечность плунжерной пары по сравнению с хромированным плунжером более чем в три раза при использовании большинства органо-неорганических материалов.

2. Наиболее высокую износостойкость прецизионных деталей и соответственно их долговечность обеспечивает формирование покрытия на основе гальванического хрома с последующим его модифицированием вермикулитом, модифицированным хитозаном.

3. Установлено, что наибольшее влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ (втулка) оказывает коэффициент трения, меньшее – модуль упругости покрытия. Минимальное влияние оказывает величина упругого восстановления покрытия. Микротвердость покрытия

практически не оказывает влияние на скорости изнашивания покрытия плунжера и стали ХВГ в данном диапазоне величин.

4. Модифицирование гальванического хрома органическими материалами позволяет существенно уменьшить коэффициент трения в плунжерной паре.

5. Высокое содержание углерода, кремния, алюминия и марганца в поверхностном слое свидетельствует об образовании износостойкого металлокерамического покрытия.

Литература

1. Леонтьев, Л.Б., Леонтьев А.Л., Шапкин Н.П. Разработка композиционных износостойких покрытий для пар трения «плунжер – втулка» топливных насосов высокого давления дизелей [Электронный ресурс]: монография // Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2012. – 103 с.
2. Кодинцев Н.П., Сидоров В.Н., Шаповалов А.П. Восстановление и упрочнение плунжерных пар топливных насосов высокого давления // Международный журнал перспективных исследований, Т. 8, №4, 2018. С. 99–111. DOI: 10.12731/2227-930X-2018-4-99-111
3. Дондиков Ю.Ж., Лысанова Н.В. Интенсификация восстановления плунжерных пар электролитическим хромированием // Сборник научно-исследовательских работ по итогам научно-практической конференции: «Ларионовские чтения – 2022» Якутск, 18 февраля 2022 г. С. 134–140.
4. Huseynov A.G., Gouishov R. Theoretical substantiation of recovery of high pressure fuel pumps of marine engines (hppu) by diffusion metallization of plug pairs // Universum: Технические науки. №4 (97). 2022. С. 56–59. DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13453
5. Шарифулин С.Н. Пути повышения эффективности работы топливной аппаратуры автотракторных дизельных двигателей / С. Н. Шарифулин, Н. Р. Агидамов. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2008. – 296 с.
6. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 октября 2019 г. № 2553-р.
7. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
8. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. – Новосибирск: Наука, 1986. – 200 с.
9. Newby K., Jones A.R. Hardness and wear characteristics for a new non-fluoride high efficiency chromium plating chemistry // SAE Techn. Pap. Ser. –1989 – № 890914. С. 1–7. DOI:10.4271/890914
10. Дунаев А.В., Ладиков В.В., Пустовой И.Ф., Голубев И.Г. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК: науч. издание – М.: ФГБНУ «Росинформротех», 2014. – 164 с.
11. Колокатов А.М. Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. – 215 с.
12. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
13. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства материалов в субмикро- и наномасштабе. Недавние результаты и достижения (Обзор) / Физика твердого тела, 2021, том 63, вып. 1. С. 3–42. DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171

References

1. Leontiev, L.B., Leontiev A.L., Shapkin N.P. Development of composite wear-resistant coatings for friction pairs "plunger-sleeve" of diesel high-pressure fuel pumps [Electronic resource]: monograph // Vladivostok: FEPU Publishing House, 2012. - 103 p.
2. Kodintsev N.P., Sidorov V.N., Shapovalov A.P. Restoration and hardening of plunger pairs of high pressure fuel pumps // International Journal of Advanced Research, Vol. 8, No. 4, 2018. P. 99–111. DOI: 10.12731/2227-930X-2018-4-99-111
3. Dondikov Yu.Zh., Lysanova N.V. Intensification of the recovery of plunger pairs by electrolytic chromium plating // Collection of research papers based on the results of the scientific and practical conference: "Larionov Readings - 2022" Yakutsk, February 18, 2022, pp. 134–140.
4. Huseynov A.G., Gouishov R. Theoretical substantiation of recovery of high pressure fuel pumps of marine engines (hppu) by diffusion metallization of plug pairs // Universum: Technical sciences. No. 4 (97). 2022, pp. 56–59. DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13453
5. Sharifulin S.N. Sharifulin S. N., Agidamov N. R. Ways to improve the efficiency of the fuel equipment of autotractor diesel engines. - Kazan: Kazan Publishing House. state un-ta, 2008. - 296 p.
6. Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period up to 2035. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated October 28, 2019 No. 2553-r.
7. Khrushchev M.M., Babichev M.A. abrasive wear. M.: Nauka, 1970. 252 p.
8. Tushinsky L.I., Plokhov A.V. Study of the structure and physical and mechanical properties of coatings. - Novosibirsk: Nauka, 1986. - 200 p.
9. Newby K., Jones A.R. Hardness and wear characteristics for a new non-fluoride high efficiency chromium plating chemistry // SAE Techn. Pap. Ser. -1989 - No. 890914. S. 1-7. DOI:10.4271/890914

10. Dunaev A.V., Ladikov V.V., Pustovoi I.F., Golubev I.G. The effectiveness of the use of mineral modifiers in technical service in the agro-industrial complex: scientific. edition - M.: FGBNU "Rosinformagrotech", 2014. - 164 p.
11. Kolokatov A.M. Repair and restoration compositions for increasing the service life of machines. Moscow: RGAU-MSHA Publ., 2016. – 215 p.
12. Golovin Yu. I. Nanoindentation and its possibilities. - M.: Mashinostroenie, 2009. - 312 p.
13. Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of materials in submicro- and nanoscale. Recent results and achievements (Review) / Solid State Physics, 2021, vol. 63, no. 1. S. 3–42. DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лев Борисович Леонтьев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и организации судоремонта, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

Андрей Львович Леонтьев, кандидат технических наук, министр энергетики и газоснабжения, Правительство Приморского края, 690110, Владивосток, ул. Светланская, 22, e-mail: gfi25leontev@mail.ru

Константин Александрович Молоков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства, Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8; доцент кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет, 690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: spektrum011277@gmail.com

Lev B. Leont'ev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Professor of the Department of Technology and Organization of Ship Repair, Marine State University named after Adm. G.I. Nevelsky, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya str., 50a, Russian Federation, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

Andrey L. Leont'ev, Ph.D. (Eng), Minister of Energy and Gas Supply, Primorsky Krai Government, 22 Svetlanskaya Str., Vladivostok, 690110, Russian Federation, e-mail: gfi25leontev@mail.ru

Konstantin A. Molokov, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Welding Engineering, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanov, 8; assistant professor of the Department of Information Technologies and Systems, Vladivostok State University, 690014, Vladivostok, Gogolya st., 41, Russian Federation, e-mail: spektrum011277@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 17.11.2022.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.01.2023.
Принята к публикации/accepted for publication 24.01.2023