

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья

УДК 621.891:621.436

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/63-74>**Методология проектирования
износостойких органо-неорганических материалов
для повышения долговечности трибосопряжения
«коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового
среднеоборотного дизеля****Лев Борисович Леонтьев^{1,✉}, Андрей Львович Леонтьев², Николай Павлович Шапкин¹,
Константин Александрович Молоков¹, Иван Борисович Друзь³**¹ Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация² ООО «Остов Констракшен»,
Владивосток, Российская Федерация³ Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

✉ leontev.lb@dvfu.ru

Аннотация. В работе представлены авторские исследования влияния химического состава органо-неорганических материалов, использованных для формирования тонкоплёночных металлокерамических покрытий на стали, и механических характеристик покрытий на эксплуатационные свойства трибосопряжения «коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля. Исследования влияния химического состава на износостойкость стали выполняли в два этапа: при формировании покрытия и в процессе триботехнических испытаний в условиях трения при граничной смазке. Для анализа влияния на эксплуатационные свойства трибосопряжения были взяты коэффициент трения и механические характеристики металлокерамических покрытий: модуль упругости, микротвёрдость и величина упругого восстановления покрытия. При формировании покрытия наибольшее влияние на износ стали оказывают содержание оксида алюминия и углерода, а также коэффициент трения. Установлено, что на долговечность трибосопряжения в условиях трения при граничной смазке наибольшее влияние оказывает модуль упругости металлокерамического покрытия. Определены критериальные значения механических свойств металлокерамического покрытия для обеспечения минимальной величины скорости его изнашивания. Наиболее высокой износостойкостью обладают покрытия и сопряжённые поверхности при использовании триботехнических материалов на основе вермикулита, имеющие минимальную величину модуля упругости и большое значение величины упругого восстановления покрытия.

Ключевые слова: вермикулит, химический состав, модифицирование, сталь, покрытие, механические свойства, скорость изнашивания, коэффициент трения

Для цитирования: Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Шапкин Н.П., Молоков К.А., Друзь И.Б. Методология проектирования износостойких органо-неорганических материалов для повышения долговечности трибосопряжения «коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 63–74.

Original article

Methodology for designing wear-resistant organic-inorganic materials to increase the durability of the “crankshaft-coating-bearing” liner tribocoupling of a medium-speed marine diesel engine

Lev B. Leontiev^{1,✉}, Andrey L. Leontiev², Nikolai P. Shapkin¹, Konstantin A. Molokov¹,
Ivan B. Druz³

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² Limited liability company “Ostov Construction”, Vladivostok, Russian Federation

³ Maritime State University named after the admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

✉ leontev.lb@dvfu.ru

Abstract. The paper presents the author's research into the influence of the chemical composition of organo-inorganic materials used to form thin-film metal-ceramic coatings on steel and the mechanical characteristics of the coatings on the performance properties of the “crankshaft-coating-bearing” liner tribocoupling of a medium-speed marine diesel engine. The study of the influence of the chemical composition on the wear resistance of steel was carried out in two stages: during the formation of the coating and during tribological tests under friction conditions with boundary lubrication. To analyze the influence on the performance properties of the tribocoupling, the friction coefficient and mechanical characteristics of the metal-ceramic coatings were taken: the modulus of elasticity, microhardness and the value of elastic recovery of the coating. When forming a coating, the greatest influence on steel wear is exerted by the content of aluminum oxide and carbon, as well as the friction coefficient. It was found that the modulus of elasticity of the metal-ceramic coating has the greatest influence on the durability of the tribocoupling under friction conditions with boundary lubrication. Critical values of mechanical properties of metal-ceramic coatings are determined to ensure a minimum value of its wear rate. The highest wear resistance is exhibited by coatings and mating surfaces when using vermiculite-based tribotechnical materials with a minimum value of elastic modulus and a high value of elastic recovery of the coating.

Keywords: vermiculite, chemical composition, modification, steel, coating, mechanical properties, wear rate, friction coefficient

For citation: Leontiev L.B., Leontiev A.L., Shapkin N.P., Molokov K.A., Druz I.B. Methodology for designing wear-resistant organo-inorganic materials to increase the durability of the “crankshaft-coating-bearing” liner tribocoupling of a medium-speed marine diesel engine. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 63–74. (In Russ.).

Введение

Для обеспечения заданной долговечности трибосистемы «коленчатый вал – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля материал покрытия хотя бы одной из деталей пары трения должен обеспечить оптимальные триботехнические характеристики в заданных условиях работы, обеспечивающие минимальные скорости изнашивания сопряжённых поверхностей и коэффициент трения. Триботехнические характеристики трибосистемы (коэффициент трения, совместимость при трении, износостойкость, прирабатываемость) зависят от химического состава материала, используемого для формирования покрытия, механических свойств поверхностного слоя (пределы прочности и текучести, модуль упругости, величина твёрдости), а также структуры. Пределы прочности основного металла и покрытия определяют несущую способность узла трения, а модуль упругости и предел текучести характеризуют предельное значение контактных напряжений для упругих деформаций при фрикционном взаимодействии. Величина упругого восстановления покрытия также играет важную роль в механизме фрикционного взаимодействия. Исследования показали, что твёрдость материала не всегда является определяющим фактором износостойкости деталей при трении [1, 2].

Следует иметь в виду, что один и тот же материал, но нанесённый различными методами или даже одним методом, но с различными энергетическими параметрами, может существенно отличаться своими служебными свойствами вследствие получаемых различных физико-механических и структурных характеристик. Поэтому разработка перспективного материала не является гарантией обеспечения требуемых служебных свойств детали, а только в совокупности с другими технологическими решениями (выбор химического состава материала и способа его нанесения, оборудования, параметров режима формирования покрытия и т.д.) позволяет получить требуемое качество покрытия и надёжность детали и трибосопряжения.

В настоящее время для модифицирования поверхностей трения применяется большое количество различных триботехнических материалов, которые способны формировать износостойкие тонкоплёночные покрытия. По структуре и свойствам основных активных компонентов, оказывающих позитивное воздействие на трение и изнашивание, следует отметить мягкие металлы и сплавы (медь, молибден, цинк, бронза и др.) на основе серпентинита, вермикулита, глинистых материалов, композиций на основе политетрафторэтилена и наноалмазов, композиций, содержащих оксид меди и дисульфид молибдена, и многих других [2–6].

Для повышения долговечности трибосопряжений перспективно формировать композитные тонкоплёночные износостойкие покрытия в результате фрикционно-механического воздействия при упрочнении поверхностей трения деталей при их изготовлении или восстановлении [5].

Обзор многочисленных исследований показал, что задача прогнозирования эксплуатационных свойств трибосистем, имеющих металлокерамические покрытия, является комплексной и требует интегрированного подхода, объединяющего принципы триботехники, трибофизики и трибохимии. Фундаментом для этого может служить приближённая модель зависимости скорости изнашивания от химического состава исходного износостойкого неорганического материала и формируемых триботехнических и механических свойств покрытия для уменьшения объёма экспериментальных исследований.

Многие аспекты проблемы влияния химического состава и формируемых механических свойств тонкоплёночных покрытий, полученных при использовании слоистых силикатов, на эксплуатационные свойства трибосопряжений требуют теоретического обобщения. Сложность решения данной проблемы определяется зависимостью механических и триботехнических свойств формирующихся покрытий от множества параметров применяемого материала: химического состава, структуры, физико-химических и геометрических параметров и др. Поэтому разработка новых трибоматериалов связана с большим объёмом экспериментальных исследований для обеспечения стабильности свойств, надёжности и эффективности покрытия. Технология получения наноструктурированных композитов и композиций на основе вермикулита для формирования металлокерамических покрытий на поверхностях трения, обладающих минимальным коэффициентом трения и высокими износо- и задиростойкостью, открывает перспективы широкого их использования в качестве триботехнических материалов [2]. Однако многие аспекты проблемы зависимости эксплуатационных свойств тонкоплёночных покрытий от химического состава и структуры используемых триботехнических материалов требуют дополнительных исследований и обобщения.

Анализ зарождения и развития повреждения поверхности трения с позиций структурной механики разрушения составляет сущность нового подхода к пониманию микромеханизмов изнашивания. Основная научная идея – установление взаимосвязи твёрдости, модуля упругости и структуры поверхности детали с износостойкостью [7, 8].

Для формирования оптимального комплекса механических, структурных и триботехнических параметров покрытия необходимо разработать методологию проектирования триботехнических материалов. Для этого нужно создать алгоритм проектирования оптимального химического состава материала и определить влияние механических характеристик на эксплуатационные свойства формируемых покрытий для уменьшения объёма исследований. Предлагаемая методология была апробирована при разработке триботехнических материалов для наиболее ответственного трибосопряжения «шейка коленчатого вала – покрытие – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля.

Цель работы – разработка методологии проектирования оптимального химического состава материала и определение зависимостей эксплуатационных свойств трибосопряжения от химического состава органо-неорганического материала и механических характеристик формируемых покрытий для уменьшения объёма исследований.

Материалы и методы исследований

В качестве базового материала для исследований был взят природный вермикулит Ковдорского месторождения, имеющий состав $\text{MgFe}_{0,8}\text{Ca}_{0,9}\text{Al}_{0,4}\text{Si}_3\text{O}_{11,7}\text{H}_2\text{O}$. Вермикулит имеет слоистую структуру и содержит большое количество оксидов кремния, магния и алюминия.

Модифицирование вермикулита кислотой позволяет уменьшить содержание оксида алюминия в 2,3 раза, который характеризуется высокими абразивными свойствами, и повысить количество оксида кремния в 2,1 раза за счёт растворения оксидов магния, железа и кальция.

Для изменения эксплуатационных свойств металлокерамических покрытий создавались композиции и композиты на основе вермикулита с искусственными и природными органо-неорганическими материалами.

Полифенилсилоксан (ПФС) – искусственный слоистый силикат, имеющий стабильный химический состав $[\text{C}_6\text{H}_5\text{SiO}_{1,5}]_n$.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) – синтетический полимер, имеющий формулу $(-\text{C}_2\text{F}_4-)_n$.

Полистирол – синтетический полимер, химическая формула которого $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$.

Целлюлоза – природное высокомолекулярное органическое соединение, полисахарид с формулой $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$.

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

Полирезорцинформальдегидная смола (ПРФС) – синтетическая смола, химическая формула $(\text{Ph}(\text{OH})-\text{CH}_2-)_n$.

Стеарат никеля – химическое соединение, соль никеля и стеариновой кислоты с формулой $\text{Ni}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$, зелёный порошок.

Ацетилацетонат меди – координационное соединение с формулой $\text{Cu}(\text{O}_2\text{C}_5\text{H}_7)_2$. Это водорастворимое ярко-синее твёрдое вещество. Монокристаллы этого соединения обладают необычным свойством высокой гибкости, что позволяет образовывать узлы. Гибкость объясняется природой межмолекулярных сил.

Для исследования использовали как смеси порошков (композиции), так и вермикулит, плакированный различными органо-неорганическими материалами (композиты).

Плакирование вермикулита и вермикулита, модифицированного кислотой, целлюлозой, ПФС, ПТФЭ, ПРФС, хитозаном и стеаратом никеля, позволяет изменить химический состав износостойкого материала (например, ввести в состав углерод или производную молибдена) и, соответственно, управлять механическими и триботехническими свойствами формируемого покрытия.

Триботехнические испытания проводили на универсальной машине трения модели УМТВК по схеме «ролик – колодка» в условиях граничного трения при постоянной скорости скольжения 0,63 м/с для сопряжения «шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника», так это один из наиболее ответственных узлов судового дизеля, определяющий необходимость его капитального ремонта. В качестве неподвижного образца использовались колодки, вырезанные из современного вкладыша типа «Rillenkager» («Miba» 33). Диски для упрочнения были изготовлены из стали 40Х твёрдостью 206 НВ и из стали 45 твёрдостью 162 НВ, так как свыше 80% коленчатых валов судовых дизелей имеют твёрдость шеек в диапазоне 160–230 НВ. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (6–7 капель в минуту). Для смазки применялось работающее дизельное масло марки М-14-Д₂(цл 30) ГОСТ 12337-84.

Нагрузку при формировании покрытия и трибоиспытаниях изменяли в соответствии с режимами, приведёнными в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Режимы формирования покрытия и триботехнических испытаний
Coating formation and tribological testing modes

Нагрузка, Н	100	200	400
Время формирования покрытия с триботехническим материалом в смазке, мин.	1	1	1
Время формирования покрытия без триботехнического материала в смазке, мин.	5	10	45
Время трибоиспытаний, мин.	5	10	45

Износ образцов определяли весовым способом на лабораторных весах с ценой деления 0,1 мг марки AUW 220D фирмы Shimadzu (Япония).

Исследование механических свойств покрытий выполняли на ультрамикротестере DUN-211S фирмы Shimadzu (Япония) при нагрузке 19,7 мН (максимальная глубина отпечатка 0,13 мкм), которая позволяет избежать влияния основного металла (толщина покрытия колеблется в пределах 6–8 мкм). Величину упругого восстановления покрытий определяли по формуле [10]:

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

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

Результаты экспериментов и их обсуждение

Проектирование триботехнических материалов для формирования металлокерамических износостойких покрытий на поверхностях трения деталей, обеспечивающих заданную долговечность, проводили в соответствии с блок-схемой (рис. 1).

Химическая обработка (ХО) исходных материалов позволяет изменять их химический состав, размер частиц, физико-химические характеристики и структуру. Термическая обработка (ТО) существенно изменяет триботехнические свойства как однокомпонентных материалов, так и композиций вследствие изменения химического состава (происходит удаление молекулы воды при температуре 600–700 °С) [2].

Износ поверхности трения происходит как в процессе её модифицирования, так и в процессе эксплуатации дизеля. Для повышения долговечности коленчатого вала необходим материал, обеспечивающий минимальные скорости изнашивания шеек на обоих этапах (упрочнения и эксплуатации). Для оптимизации химического состава триботехнического материала необходимы математические зависимости влияния состава материала, механических и триботехнических свойств покрытия на скорости изнашивания.

В процессе формирования металлокерамического покрытия фрикционно-силовым методом происходит изнашивание стали, причём скорость изнашивания определяется преимущественно химическим составом триботехнического материала (табл. 2), в первую очередь содержанием алюминия и углерода, в меньшей степени – коэффициентом трения. Обработка результатов экспериментов (табл. 2) позволила установить зависимость скорости изнашивания стали в процессе формирования покрытия от содержания оксида алюминия и углерода, а также от коэффициента трения при наличии триботехнического материала в смазке ($R^2 = 0,85$):

$$V_{\text{и}} = -2,28 + 0,412AlO_2 + 0,157C + 16,25 k_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Наибольшее влияние на скорость изнашивания стали при формировании покрытия оказывает содержание оксида алюминия в модифицирующем материале, меньшее количество углерода и коэффициент трения (рис. 2). Оксид алюминия, с одной стороны, повышает износостойкость покрытия, а с другой – приводит к повышенному изнашиванию при формировании покрытия в начальном периоде вследствие его высоких абразивных свойств.

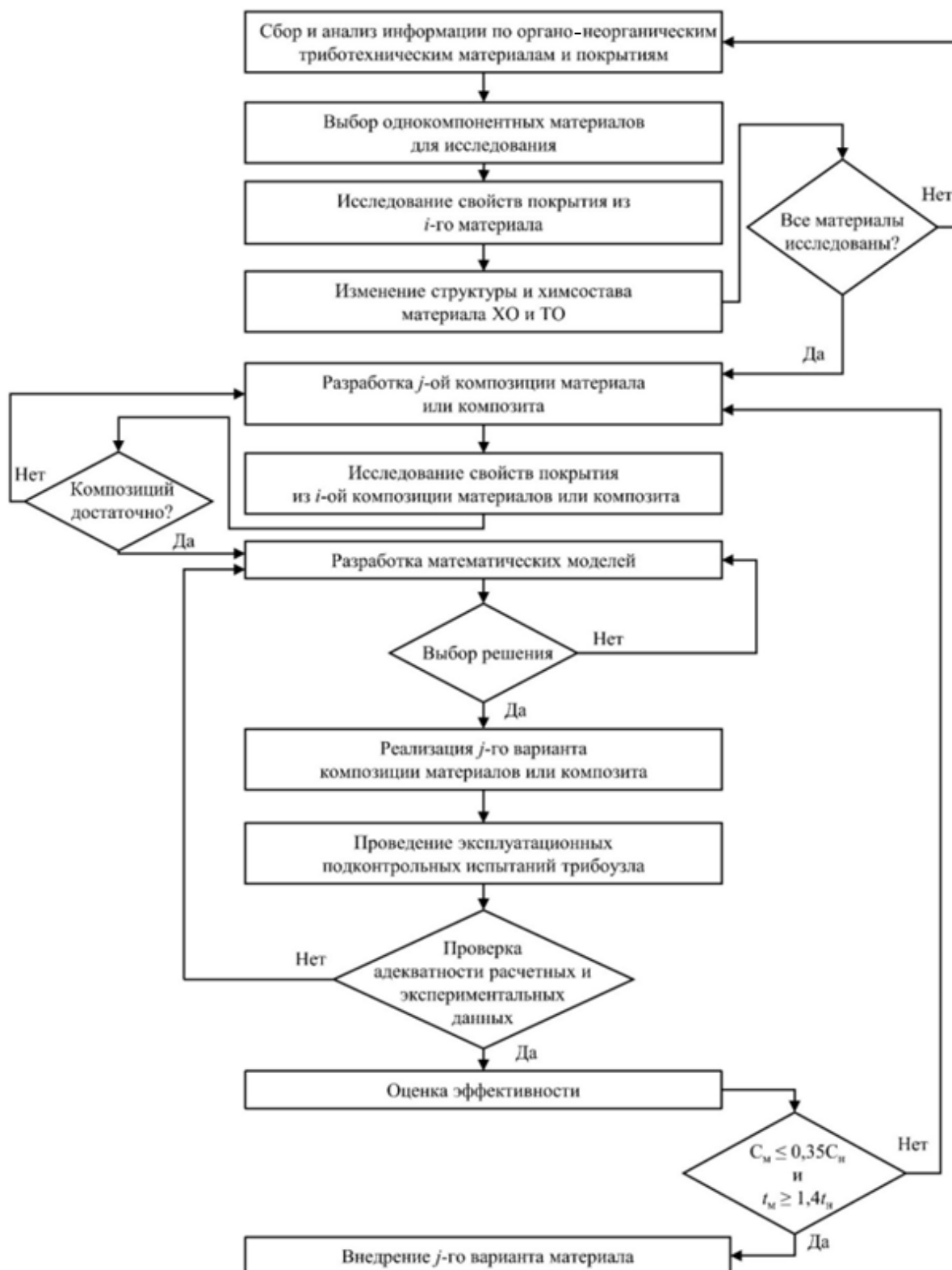


Рис. 1. Блок-схема проектирования оптимального химического состава триботехнических материалов для формирования износостойких покрытий
(C_m – стоимость триботехнического материала; C_n – стоимость формирования покрытия;
 t_b – ресурс детали с износостойким покрытием; t_n – ресурс новой детали;
ХО – химическая обработка; ТО – термическая обработка)

Fig. 1. Block diagram for designing the optimal chemical composition of tribotechnical materials for forming wear-resistant coatings (C_m – cost of tribotechnical material; C_n – cost of forming coating;
 t_b – service life of a part with wear-resistant coating; t_n – service life of a new part;
 XO – chemical treatment; TO – heat treatment)

Таблица 2 / Table 2

Основные элементы триботехнического материала, коэффициент трения и скорость изнашивания при формировании покрытия на поверхности стали 40X
Main elements of tribotechnical material, friction coefficient and wear rate during coating formation on the surface of 40X steel

№ п/п	Материал	Al ₂ O ₃ , %	С, %	Коэффициент трения в начальный период формирования покрытия	Скорость изнашивания, мг/ч
Однокомпонентные материалы					
1	Вермикулит	11,8	–	0,270	7,1
2	Вермикулит + HCl	5,2	–	0,200	3,1
Композиции материалов					
3	Вермикулит + 9% ПФС	10,5	5,2	0,135	4,7
4	Вермикулит + 50% ПТФЭ	5,8	12,	0,144	4,7
5	Вермикулит + 9% ацетилацетоната меди	9,8	4,7	0,144	4,7
6	Вермикулит + HCl + производная молибдена*	5,0	–	0,057	0,2
7	Вермикулит + HCl + ПФС	3,1	10,	0,098	2,2
Композиты					
8	Вермикулит + ПФС	10,2	5,5	0,092	4,5
9	Вермикулит + ПТФЭ	6,5	10,	0,108	3,5
10	Вермикулит + HCl + хитозан	1,26	9,4	0,156	2,4
11	Вермикулит + HCl + полистирол	3,0	5,6	0,057	0,9
12	Вермикулит + HCl + целлюлоза*	4,5	7,5	0,028	0,2
13	Вермикулит + HCl + ПРФС	4,1	2,9	0,085	1,0
14	Вермикулит + HCl + 50% стеарата никеля	2,6	23,	0,057	3,7
15	Вермикулит + HCl + 70% стеарата никеля	2,1	33,	0,022	3,4
Примечание: * – Данные результаты при определении зависимости (1) не учитывались вследствие существенного отличия их параметров скорости изнашивания.					

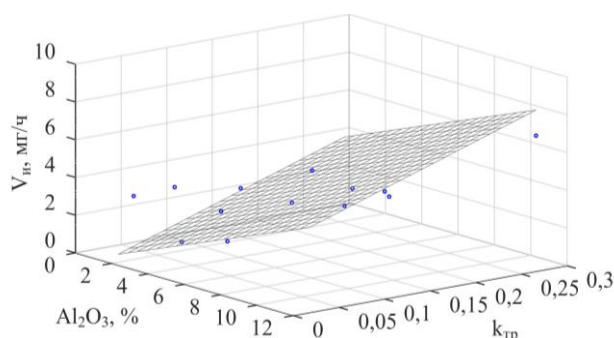


Рис. 2. Влияние содержания оксида алюминия в модифицирующем материале и коэффициента трения на скорость изнашивания при формировании покрытия на поверхности стали 40X

Fig. 2. The influence of aluminum oxide content in the modifying material and the friction coefficient on the wear rate during the formation of a coating on the surface of 40X steel

Плакирование частиц вермикулита природными и синтетическими полимерами (целлюлозой, хитозаном, ПФС, ПТФЭ, ПРФС) позволяет уменьшить его абразивные свойства на этапе формирования покрытия.

Коэффициент трения наибольший при наличии триботехнического материала в смазке, а также в первые 5 минут формирования покрытия при подаче чистой смазки, затем плавно снижается и после 20–30 минут стабилизируется и изменяется незначительно в небольшом диапазоне.

Для большинства материалов увеличение содержания углерода приводит к возрастанию скорости изнашивания вследствие образования карбида кремния в условиях высоких температуры и удельной нагрузки на пятнах контакта сопряжения «вал – индентор», исключение составляет вермикулит, плакированный целлюлозой. Несмотря на высокое содержание кремния, он не оказывает влияния на скорость изнашивания при формировании покрытия вследствие особенностей строения целлюлозы.

Плакирование частиц вермикулита природными и синтетическими полимерами (целлюлозой, хитозаном, ПФС, ПТФЭ, ПРФС) позволяет уменьшить его абразивные свойства на этапе формирования покрытия.

Минимальными величинами скорости изнашивания и коэффициента трения в процессе модифицирования, причём существенно меньше определённых по формуле 1, характеризуются композит вермикулит + HCl + целлюлоза и композиция модифицированного вермикулита с производной молибдена вследствие изменения как условий трения, так и процесса формирования покрытия.

Частицы неплакированного вермикулита оказывают царапающее воздействие на упрочняемую поверхность вследствие их размера, значительно превышающего параметры шероховатости детали. Плакирование вермикулита более мягкими материалами снижает скорость изнашивания стали в процессе формирования покрытия, но остаётся значительной по сравнению с использованием вермикулита, модифицированного соляной кислотой.

Таким образом, для получения минимальной скорости изнашивания стали на этапе формирования покрытия необходимо, чтобы содержание оксида алюминия в триботехническом материале на основе вермикулита находилось в пределах 4,5–5,2%.

Химический состав триботехнического материала на этапе триботехнических испытаний оказывает влияние через различные величины механических и триботехнических параметров (табл. 3). Наибольшую величину модуля упругости имеет покрытие, полученное при использовании ПТФЭ, наименьшее – вермикулита. Максимальная величина упругого восстановления покрытия обеспечивается при использовании ПФС для плакирования частиц вермикулита, несколько меньшее – при применении ПТФЭ и композиций вермикулита с хитозаном.

Величины механических свойств поверхностного слоя стали, который участвует в процессе трения, существенно отличаются от параметров основного металла (подповерхностного слоя), поэтому максимальная глубина отпечатка от индентора при определении механических свойств исходной стали и покрытия не должна превышать 0,5 мкм, которая обеспечивается при нагрузке 19,7 мН. При нагрузке 150–218 мН максимальная глубина отпечатка находится в пределах 0,6–1,6 мкм в зависимости от микротвёрдости слоя. С увеличением максимальной глубины отпечатка свыше 0,5 мкм изменяются модули упругости и микротвёрдости как стали, так и покрытия вследствие существенного влияния свойств основного металла, которые становятся близкими к параметрам подслоя.

Анализ механических свойств поверхностного слоя неупрочнённых сталей 40Х и 45 показал, что в результате трибоиспытаний нанотвёрдость и величина упругого восстановления возрастают, а модуль упругости уменьшается (табл. 3). В процессе триботехнических испытаний механические свойства поверхностного слоя стали существенно изменяются и характеризуются значительным разбросом величин, соответственно, и скорости изнашивания как вала, так и вкладыша имеют большой диапазон значений. Наибольшее влияние на скорость изнашивания вала оказывает твёрдость основы: увеличение твёрдости в 1,4 раза приводит к уменьшению средней скорости изнашивания в 3,4 раза.

Формирование металлокерамических покрытий позволяет существенно снизить скорость изнашивания вала в условиях трения при граничной смазке, а также скорость изнашивания вкладыша подшипника для большинства типов покрытий (табл. 4).

Обработка результатов экспериментов (табл. 3) позволила установить зависимость скорости изнашивания вала в условиях трения при граничной смазке для стали 40Х (2) от механических характеристик металлокерамического покрытия и коэффициента трения ($R_2 = 0,9$):

$$V_b = 0,58 + 0,077 \cdot 10^{-5} E - 0,0005 HV - 0,176 We + 4,14 K_{тр}. \quad (2)$$

Таблица 3 / Table 3

**Механические свойства сталей и сталей с различными износостойкими покрытиями
и триботехнические свойства пары трения «вал – вкладыш подшипника»**
Mechanical properties of steels and steels with various wear-resistant coatings and
tribotechnical properties of the friction pair "shaft – bearing shell"

Материал для формирования покрытия вала	Модуль упругости покрытия $E \times 10^5$, Н/мм ²	Нанотвёрдость, HV	Величина упругого восстановления покрытия W_e	Коэффициент трения	Скорость изнашивания вала, мг/ч	Скорость изнашивания вкладыша, мг/ч
Сталь 40Х, твёрдость 215 НВ						
Сталь после шлифования	10,3	356	0,68	–	–	–
Сталь после трибоиспытания	9,6	588	0,76	0,043	2,6	10,5
	8,5	610	0,85	0,079	1,7	5,1
Вермикулит	1,2	594	0,25	0,038	0,5	3,5
ПТФЭ*	18,5	406	1,27	0,054	1,6	2,1
Композиция (вермикулит + ПТФЭ)*	10,8	578	0,85	0,050	1,0	1,3
Вермикулит + HCl	1,1	699	0,70	0,036	0,3	1,8
Композиция (вермикулит + HCl + хитозан)	6,5	544	0,92	0,043	0,8	3,0
Композит (вермикулит + HCl + + хитозан)	3,8	480	1,15	0,036	0,5	5,1
Композиция (вермикулит + HCl) + + ПФС	5,9	544	2,04	0,014	0,4	5,3
Композит вермикулит + ПФС	1,8	587	0,85	0,029	0,4	2,6
Композиция (вермикулит + HCl) + + производная молибдена	3,8	468	0,72	0,022	0,6	1,7
Вермикулит + HCl + целлюлоза	1,9	420	0,5	0,022	0,5	5,6
Сталь 45, твёрдость 152 НВ						
Сталь после шлифования	12,6	482	0,43	–	–	–
Сталь после трибоиспытания	11,4	559	0,68	0,042	5,0	8,0
	12,0	542	0,46	0,060	9,7	6,2
Вермикулит	1,8	514	0,86	0,043	2,2	4,0
Композит вермикулит + магнийфенилсилоксан	1,7	587	0,85	0,024	1,6	2,6
Композит: вермикулит + хитозаном + MgCO ₃	2,3	604	2,23	0,024	0,71	3,2
Серпентинит	4,2	489	0,85	0,014	1,9	2,5

Наибольшей износостойкостью обладают покрытия, имеющие минимальную величину модуля упругости и максимальную величину упругого восстановления. Таким образом, изменяя химический состав модифицирующего материала, можно управлять износостойкостью покрытия.

Анализ износостойкости покрытий на стали 45 в условиях трения при граничной смазке показал аналогичное влияние параметров (формула 2), только необходимо учитывать влияние твердости основного металла (коэффициент влияния колеблется в пределах 4,2–4,5).

Анализ износостойкости покрытий позволяет определить критериальные значения механических свойств металлокерамического покрытия для обеспечения минимальной величины скорости его изнашивания:

- модуль упругости, Н/мм² $(1,1–3,8) \times 10^{-5}$;
- величина упругого восстановления $\geq 0,7$.

Модуль упругости покрытия оказывает наибольшее влияние на его скорость изнашивания (рис. 3), величина упругого восстановления покрытия оказывает существенное влияние при её значениях больше 1, влияние твёрдости и коэффициента трения минимально.

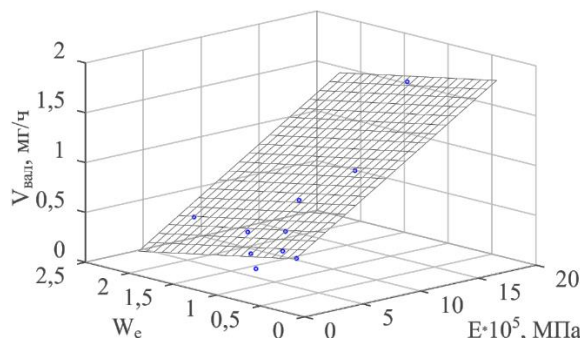


Рис. 3. Зависимость скорости изнашивания модифицированной стали от величин модуля упругости и упругого восстановления покрытия

Fig. 3. Dependence of the wear rate of modified steel on the values of the modulus of elasticity and elastic recovery of the coating

Следует отметить, что по мере изнашивания тонкоплёночного покрытия величина модуля упругости поверхностного слоя возрастает у материалов с низким значением, но уменьшается у покрытий с величиной большей, чем у неупрочнённой стали, и приближается к величине её модуля.

Скорость изнашивания вкладыша практически не зависит от твёрдости основы стали и покрытия, а определяется величинами коэффициента трения и упругого восстановления покрытия. Минимальная скорость изнашивания вкладыша обеспечивается при минимальном коэффициенте трения. Величины упругого восстановления и модуль упругости покрытия оказывают существенное влияние при значениях $We > 1,0$ и $E > 10 \text{ Н/мм}^2$.

Анализ износостойкости вкладыша подшипника позволяет определить критериальные значения коэффициента трения и механических свойств металлокерамического покрытия для обеспечения минимальной величины скорости его изнашивания:

- коэффициент трения $< 0,043$;
- нанотвёрдость, HV > 550 ;
- величина упругого восстановления $\geq 1,0$.

Анализ результатов испытаний различных материалов для формирования покрытий показал, что наиболее перспективными являются вермикулит, композиты и композиции на его основе, которые позволяют получить минимальную величину модуля упругости и низкий коэффициент трения в условиях работы трибосистемы при граничной смазке. Различные добавки позволяют изменять как твёрдость, так и величину упругого восстановления покрытия и, соответственно, изменять скорости изнашивания сопряжённых поверхностей деталей.

В связи с тем что коленчатый вал является деталью, определяющей срок службы двигателя до его капитального ремонта, необходимо обеспечить максимальную износостойкость шеек вала, а вкладыши заменяются по мере их изнашивания без вывода двигателя из эксплуатации, поэтому необходимо выбирать критериальные параметры, обеспечивающие минимальную скорость изнашивания шеек.

Выводы

Предлагаемая методология проектирования наноструктурированных композиционных органо-неорганических триботехнических материалов позволяет существенно уменьшить объём экспериментальных исследований благодаря полученным зависимостям износостойкости от химического состава материала и механических характеристик покрытия. Изменяя химический состав и структурные характеристики материалов на основе вермикулита, можно управлять

эксплуатационными свойствами формируемых покрытий и, соответственно, триботехническими характеристиками на этапах формирования покрытия и эксплуатации трибосопряжения.

На этапах формирования покрытия на скорость изнашивания стали наибольшее влияние оказывают химический состав (в частности, величина содержания оксида алюминия), структура (кристаллическая или полиморфная), размер частиц. Следует ограничивать содержание оксида алюминия (оптимальное количество – 4,5–5,2%).

Критериальные значения механических свойств металлокерамического покрытия для обеспечения минимальной величины скорости его изнашивания должны быть: модуль упругости $(1,1\text{--}3,8)\times 10^{-5}$ Н/мм² и величина упругого восстановления $\geq 0,7$.

Получение оптимальных эксплуатационных свойств для обеспечения долговечности и эффективности трибосопряжения (на примере сопряжения «коленчатый вал – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля) может быть достигнуто путём применения композиций и композитов на основе вермикулита для формирования тонкоплёночных износостойких покрытий на стальных поверхностях. Максимальную износостойкость трибосопряжения обеспечивают следующие материалы: композит вермикулит + HCl + 9% ПФС и композиция вермикулит + HCl + производная молибдена.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Л.Б. Леонтьев – разработка концепции исследования и проведение экспериментальных исследований; А.Л. Леонтьев – проведение экспериментальных исследований, анализ и интерпретация результатов исследования; Н.П. Шапкин – разработка и изготовление органо-неорганических материалов; К.А. Молоков – расчёт математических зависимостей; И.Б. Друзь – перевод на английский язык, оформление и редактирование текста.

L.B. Leont'ev – development of the research concept and conducting experimental research; A.L. Leont'ev – conducting experimental studies, analyzing and interpreting research results; N.P. Shapkin – development and manufacture of organo-inorganic materials; K.A. Molokov – calculation of mathematical dependencies; I.B. Druz – English translation, text design and editing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Шапкин Н.П., Макаров В.Н., Молоков К.А., Болотова В.П. Влияние химического состава материала и физико-механических свойств покрытия на износостойкость трибоузла «вал – покрытие – вкладыш подшипника» // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 4. С. 326–329. DOI: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-4-326-329>
2. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Макаров В.Н., Токликишвили А.Г. Триботехнические наноматериалы и надежность судовых дизелей: монография. Владивосток: ДВФУ, 2020. 277 с.
3. Усачев В.В., Погодаев Л.И., Телух Д.М., Кузьмин В.В. Введение в проблему использования природных слоистых геомодификаторов в трибосопряжениях // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 1. С. 36–42.
4. Дунаев А.В., Ладиков В.В., Пустовой И.Ф., Голубев И.Г. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК. Москва: Росинформагротех, 2014. 164 с.
5. Колокатов А.М. Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 215 с.
6. Jaber M., Miehle-Brenble J., Roux M., Dentzer J. and other. A new Al, Mg-organoclay // New J. Chem. 2002. № 26. P. 1597–1600.
7. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. Новосибирск: НЭТИ, 1991. 64 с.
8. Кубич В.И., Ивченко Л.И. О механических характеристиках приповерхностных слоев элементов трибосопряжения «шейка – покрытие – вкладыш» // Проблемы трибологии. 2011. № 4. С. 97–102.

REFERENCES

1. Leont'ev L.B., Leont'ev A.L., Shapkin N.P., Makarov V.N., Molokov K.A. and Bolotova V.P. Influence of the coating composition and properties on the wear resistance of “shaft – coating – bearing” systems. *Russian Engineering Research*, 2023, vol. 43, no. 6, pp. 684–687. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2306014X>
2. Leont'ev L.B., Shapkin N.P., Leont'ev A.L., Makarov V.N., Toklikishvili A.G. Tribological nano-materials and reliability of marine diesel engines: Monograph. Vladivostok: FEPU, 2020. 277 p. (In Russ.).
3. Usachev V.V., Pogodaev L.I., Telukh D.M., Kuzmin V.V. Introduction to the problem of using natural layered geomodifiers in tribocouplings. *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2010, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.).
4. Dunaev A.V., Ladikov V.V., Pustovoy I.F., Golubev I.G. Efficiency of using mineral modifiers in technical service in the agro-industrial complex: scientific. Edition. Moscow: FGBNU "Rosinformagrotech", 2014. 164 p. (In Russ.).
5. Kolokatov A.M. Repair and restoration compositions for increasing the service life of machines. Moscow: Publishing house of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, 2016. 215 p. (In Russ.).
6. Jaber M., Miehe-Brenble J., Roux M., Dentzer J. and other. A new Al, Mg-organoclay. *New J. Chem.*, 2002, no. 26, pp. 1597–1600.
7. Tushinskiy L.L., Poteriaev Yu.P. Problems of materials science in tribology. Novosibirsk: NETI, 1991. 64 p. (In Russ.).
8. Kubich V.I., Ivshchenko L.I. On the mechanical characteristics of the near-surface layers of the tribocoupling elements “shaft neck – coating – liner”. *Problems of Tribology*, 2011, no. 4, pp. 97–102. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонтьев Лев Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор Департамента промышленной безопасности Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ leontyev.l.b@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8072-306X>

Lev B. Leont'ev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Industrial Safety of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Леонтьев Андрей Львович – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Остов Констракшен» (Владивосток, Российская Федерация),

✉ gfi25leontev@mail.ru

Andrey L. Leont'ev, Candidate of Technical Sciences, general manager Limited liability company “Ostov Construction” (Vladivostok, Russian Federation).

Шапкин Николай Павлович – доктор химических наук, профессор, профессор Департамента химии и материалов, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

✉ npshapkin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4287-8917>

Nikolai P. Shapkin, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemistry and Materials, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Молюков Константин Александрович – кандидат технических наук, доцент Департамента промышленной безопасности Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ spektrum011277@gmail.com

Konstantin A. Molokov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Safety of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Друзь Иван Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры основы инженерного проектирования, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского (Владивосток, Российская Федерация),

✉ druz_i_b@mail.ru

Ivan B. Druz, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Fundamentals of Engineering Design, Maritime State University named after the admiral G.I. Nevelskoy (Vladivostok, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 09.03.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 13.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.