

Научная статья

УДК 621.893: 629.5.03

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-1/56-66>

Влияние твердости шеек вала и химического состава триботехнических органо-неорганических материалов для формирования покрытий на стали на эксплуатационные свойства подшипников коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей

Андрей Львович Леонтьев¹, Лев Борисович Леонтьев^{2✉}, Николай Павлович Шапкин²

¹ Правительство Приморского края, Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

✉ leontyev.lb@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены обобщающие результаты исследований эксплуатационных свойств трибосопряжения «коленчатый вал – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля. Основной причиной отказов коленчатых валов является износ шеек. Для повышения долговечности подшипников коленчатых валов предлагается формировать износостойкие тонкопленочные металлокерамические покрытия на шейках вала, которые получают методом трибомеханической модификации поверхности органо-неорганическими материалами на основе вермикулита. Установлено, что на скорость изнашивания деталей трибосопряжения «коленчатый вал – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля влияют механические свойства: наибольшее действие оказывает модуль упругости поверхностного слоя, меньшее – его твердость, а также высотные параметры структуры поверхности. Для повышения износостойкости деталей трибосопряжения «коленчатый вал – вкладыш подшипника» и, соответственно, его долговечности необходимо формировать на поверхности шеек тонкопленочные металлокерамические покрытия, обеспечивающие оптимальные параметры механических свойств и структуры поверхности.

Ключевые слова: дизель, подшипник, покрытие, износ, триботехнический материал, механические свойства, топография поверхности

Для цитирования: Леонтьев А.Л., Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П. Влияние твердости шеек вала и химического состава триботехнических органо-неорганических материалов для формирования покрытий на стали на эксплуатационные свойства подшипников коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 1(58). С. 56–66.

Original article

The influence of the hardness of the shaft journals and the chemical composition of tribotechnical organic-inorganic materials for forming coatings on steel on the performance properties of crankshaft bearings marine medium speed diesel engines

Andrey I. Leont'ev¹, Lev B. Leont'ev^{2✉}, Nikolay P. Shapkin²

¹ Government of the Primorsky Territory, Vladivostok, Russia

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

✉ leontyev.lb@yandex.ru

Abstract. The paper summarizes the results of studies of the operational properties of the tribo-tension "crankshaft – bearing liner" of a marine medium-speed diesel engine. The main cause of crankshaft failures is the wear of the necks. To increase the durability of crankshaft bearings, it is proposed to form wear-resistant thin-film metal-ceramic coatings on the shaft necks, which are obtained by tribomechanical modification of the surface with organo-inorganic materials based on vermiculite.

It has been established that the following factors affect the wear rate of the parts of the tribo-tension "crankshaft – bearing liner" of a marine medium-speed diesel engine: mechanical properties: the modulus of elasticity of the surface layer has the greatest influence. To increase the wear resistance of the parts of the tribo-tension "crankshaft – bearing liner" and, accordingly, its durability, it is necessary to form thin-film metal-ceramic coatings on the surface of the necks, providing optimal parameters of mechanical properties and surface structure.

Keywords: diesel, bearing, coating, wear, tribotechnical material, mechanical properties, surface topography

For citation: Leont'ev A.I., Leont'ev L.B., Shapkin N.P. The influence of the hardness of the shaft journals and the chemical composition of tribotechnical organic-inorganic materials for forming coatings on steel on the performance properties of crankshaft bearings marine medium speed diesel engines. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2024, no. 1(58), pp. 56–66. (In Russ.).

Введение

Ресурс судового дизеля до капитального ремонта зависит в основном от состояния коленчатого вала. Шейки вала подвержены трению скольжения при больших скоростях и высоких удельных давлениях. Основной причиной отказов коленчатых валов является износ шеек.

На среднеоборотных двигателях, установленных на судах Дальневосточного региона, шейки коленчатых валов имеют твердость в интервале от 164 НВ до 58 HRC, то есть эксплуатируются как закаленные, так и незакаленные валы. Установлено, что свыше 80% коленчатых валов имеют твердость в пределах 164–247 НВ [1].

Большое влияние на износостойкость трибосопряжения оказывают механические свойства и структура (топография) поверхностей, поэтому анализ их влияния на эксплуатационные характеристики весьма важен [2–5]. Изменение структуры поверхности происходит вследствие пластической деформации и процесса изнашивания. Тип контактной деформации определяется показателем пластичности ψ [3]:

$$\psi = \left(\frac{E}{H}\right) \left(\frac{Sq}{\beta}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости;

H – твердость;

Sq – среднеквадратичное значение высот поверхности ограниченного масштаба;

β – средний радиус неровностей.

Если ψ меньше 0,6, то вероятность пластической контактной деформации мала [9]. В паре трения «шейка вала – вкладыш подшипника» изменение структуры поверхности шейки вала происходит за счет изнашивания. Чем меньше величина показателя пластичности, тем меньше величина удельного давления на микронеровности поверхности трения.

Анализ выражения (1) позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на пластичность и, соответственно, износостойкость оказывают величины модуля упругости и твердость, меньшее — параметры структуры поверхности. Однако оценка структуры поверхности трения детали позволяет в большинстве случаев характеризовать ее качество и триботехнические свойства [6, 7].

Исследования по влиянию механических свойств покрытия на износостойкость трибоузла «вал – покрытие – вкладыш подшипника» [8] позволили установить доминирующее влияние модуля упругости на износ как вала, так и вкладыша.

При соприкосновении микронеровностей вследствие больших контактных давлений происходит их пластическая и упругая деформации и, как следствие, их разрушение. Средняя толщина частиц разрушения пропорциональна максимальному перепаду высот поверхности. Высота микронеровностей и размер частиц хорошо коррелируют – толщина частиц составляет примерно 0,5 Ra [9].

В период начального износа высота микронеровностей уменьшается на 65–75%, изменяется их форма (выступы округляются), а площадь фактического касания возрастает; удельные давления на контактных площадках уменьшаются (окончание периода приработки). В этот период на поверхности образуется новая структура — «оптимальная» для данных условий работы (начало периода длительной стабильной работы трущейся пары) [10].

Эксплуатационные свойства трибоузла можно повышать путем химико-термической обработки поверхностей трения [11] или их модифицированием, применяя органо-неорганические триботехнические материалы [1, 8].

Цель работы – анализ влияния твердости шеек вала и химического состава триботехнических органо-неорганических материалов для формирования покрытий на шейках валов на эксплуатационные свойства подшипников коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей.

Для решения этой задачи были проведены комплексные исследования механических свойств поверхностных слоев и топографии поверхностей после шлифования и триботехнических испытаний, а также по определению скоростей изнашивания деталей трибосопряжения «вал – вкладыш подшипника».

Для определения влияния механических свойств поверхности и твердости основы вала, состава органо-неорганического материала для формирования покрытия на структуру поверхности детали, а также выявления взаимосвязи параметров топографии поверхностей с износостойкостью различных покрытий и сталей различной твердости были проведены сравнительные триботехнические испытания.

Материалы и методы исследований

Для исследования эксплуатационных свойств были изготовлены образцы из сталей 45 твердостью 162 HV и 460 HV и 40X твердостью 230 HV. На части образцов были сформированы тонкопленочные износостойкие металлокерамические покрытия путем трибомеханической модификации. Для формирования покрытия выбраны следующие органо-неорганические материалы: полимагнийфенилсилоксан (ПМФС); полифенилсилоксан (ПФС); вермикулит Ковдорского месторождения; вермикулит, модифицированный соляной кислотой; вермикулит, плакированный хитозаном и $MgCO_3$; композиция: вермикулит, плакированный хитозаном и $MgCO_3$, и препарат Ресурс; вермикулит, плакированный ПФС; композиция: вермикулит, модифицированный соляной кислотой, и производная молибдена (Трибоникс), вермикулит, модифицированный соляной кислотой и плакированный резорцинформальдегидной смолой (РФС). Исходный вермикулит содержит большое количество оксидов кремния, алюминия, модифицирование его соляной кислотой и органо-неорганическими материалами позволяет существенно изменять химический состав, механические свойства и структуру поверхности детали [1, 8]. Формирование покрытия осуществляли фрикционно-механическим способом [1].

Триботехнические испытания проводили на универсальной машине модели УМТВК по схеме «ролик–колодка» в условиях граничного трения при постоянной скорости скольжения 0,628 м/с в течение 3 часов. В качестве неподвижного образца использовали колодки, вырезанные из современных вкладышей типа Rillenkager [8].

Смазку пары трения осуществляли капельным способом (5–6 капель в минуту). Для смазки применялось работающее дизельное масло марки М-14-Д₂(цл 30) ГОСТ 12337-84 с главного судового среднеоборотного двигателя, эксплуатировавшегося на тяжелых сортах топлива, так как при работе двигателя на тяжелых сортах топлива смазка содержит повышенное количество механических примесей.

Исследование механических свойств покрытий выполняли на ультрамикротестере DUH-211S фирмы Shimadzu (Япония) при нагрузке 19,7 мН.

Для оценки топографии поверхности применяли трехмерное профилометрирование как наиболее информативное [1, 6, 7] в соответствии с ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 с помощью оптического микроскопа-профилометра Contour GT-I 3D.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ параметров структуры поверхности немодифицированных и модифицированных образцов после триботехнических испытаний проводили на основании различных характеристик (высотных, гибридных и функциональных). Установлено (табл. 1), что средние арифметические значения высот поверхности ограниченного масштаба (Sa) немодифицированных сталей после триботехнических испытаний существенно превышают исходные значения после шлифования и аналогичные параметры модифицированных сталей; исключение составляет закаленная сталь (460 HV) — у нее величина параметра в процессе триботехнических испытаний практически не изменяется.

Величина параметра Sa у незакаленных сталей (твердость 162–206 HV) после 3 часов триботехнических испытаний возрастает в 2,5–8,2 раза по сравнению с исходной. Значительный разброс значений параметра Sa объясняется наличием различной дисперсности абразива в смазке и, соответственно, глубины царапин на поверхности трения.

Анизотропия геометрических характеристик по направлениям у немодифицированных образцов (рис. 1) весьма велика.

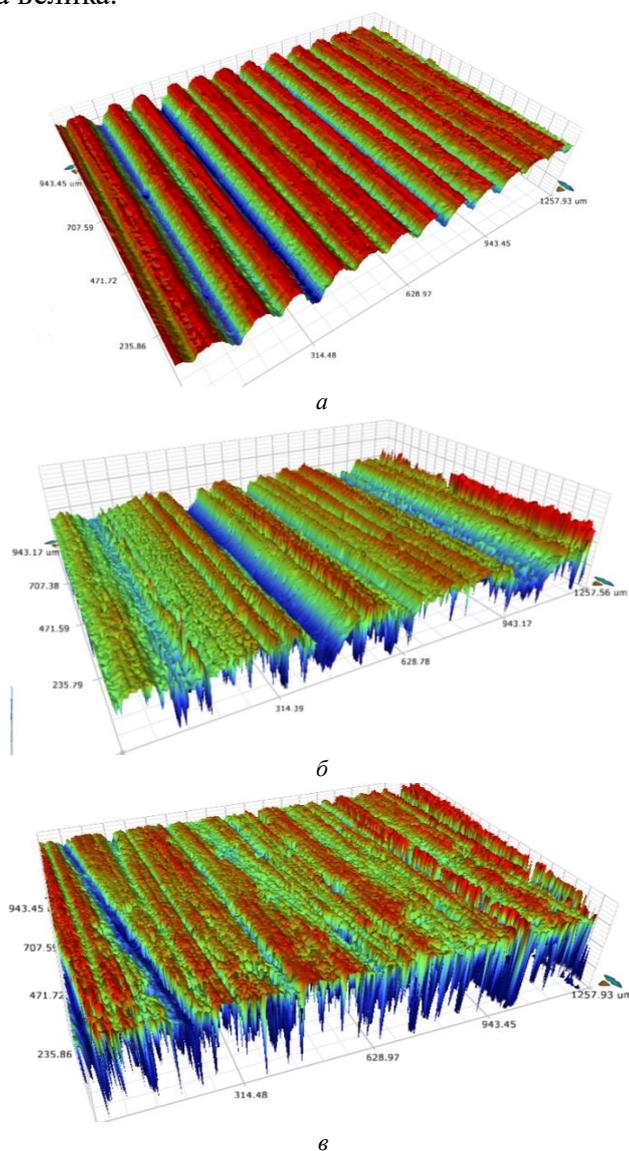


Рис. 1. Топография поверхностей трения немодифицированных сталей: а – сталь 40X после шлифования (206 HV); б – сталь 45 после трибоиспытаний (162 HV); в – сталь 45 после трибоиспытаний (460 HV)

Fig. 1. Topography of friction surfaces of unmodified steels: a – 40X steel after grinding (206 HV); б – steel 45 after tribological tests (162 HV); c – steel 45 after tribological tests (460 HV)

Параметры структуры и механические свойства поверхности немодифицированных и модифицированных сталей 45 и 40X после триботехнических испытаний

Structure parameters and mechanical properties of the surface of unmodified and modified steels 45 and 40X after tribological tests

Параметры	Сталь 45 после шлифования	Марка стали + материал для модифицирования											
		45	45	40X	Сталь 45 + вермикулит	Сталь 45 + ПМФС	Сталь 45 + (вермикулит + хитозан + MgCO ₃)	Сталь 45 + (вермикулит + хитозан + MgCO ₃) + Ресурсе	Сталь 45 + (вермикулит + ПФС)	Сталь 40X + Трибоникс	Сталь 40X (вермикулит + HCl + ПФС)	Сталь 40X + (вермикулит + HCl + хитозан)	Сталь 40X + вермикулит + HCl + ПФС
Твердость основы / поверхностного слоя, HV	$\frac{162}{356}$	$\frac{162}{542}$	$\frac{460}{779}$	$\frac{206}{588}$	$\frac{162}{694}$	$\frac{162}{694}$	$\frac{162}{506}$	$\frac{162}{604}$	$\frac{460}{618}$	$\frac{206}{460}$	$\frac{206}{668}$	$\frac{206}{450}$	$\frac{206}{593}$
Модуль упругости, $\times 10^5$ МПа	10,3	12,0	6,4	12,6	1,6	16,8	2,3	10,9	7,4	4,6	2,0	3,7	5,6
Sa, мкм	0,67	1,7	0,7	5,5	2,0	2,9	2,01	1,4	0,8	1,1	2,2	1,3	1,6
Sq, мкм	0,91	2,1	1,5	6,9	2,7	3,3	2,62	1,9	1,0	1,5	2,7	2,4	1,9
Sp, мкм	4,75	14,1	3,6	14,1	22,1	22,5	20,34	14,3	6,9	4,1	22,3	2,9	3,5
Sv, мкм	-5,60	-9,9	-23,7	-23,8	-15,3	-19,9	-18,17	-9,7	-6,9	-7,2	-12,8	-85,4	-8,1
Sz, мкм	10,36	24,0	27,4	37,9	37,4	42,4	38,52	24,1	13,8	11,3	35,1	18,3	11,6
Sdq, град.	11,81	18,0	12,4	27,7	22,2	45,0	43,03	19,1	16,3	10,1	28,1	49,0	12,5
Vm, нм ³ /нм ²	48,12	76,4	36,1	34,0	147,0	80,6	66,11	64,3	29,3	41,1	45,8	23,2	30,7
Vv, нм ³ /нм ²	124	335	202	536	365	274	460	409	120	317	303	401	248
Скорость изнашивания вала / вкладыша, мг/ч	-	$\frac{4,5}{7,1}$	$\frac{2,1}{7,3}$	$\frac{2,7}{10,5}$	$\frac{0,6}{3,5}$	$\frac{1,6}{2,2}$	$\frac{0,6}{3,2}$	$\frac{0,9}{2,7}$	$\frac{1,4}{3,2}$	$\frac{0,6}{1,5}$	$\frac{0,3}{5,3}$	$\frac{0,4}{3,7}$	$\frac{0,3}{1,1}$

Модифицирование стали любым из исследуемых триботехническим материалом и формирование покрытия (табл. 1) позволяют значительно уменьшить параметр Sa у закаленных сталей более чем в 2 раза. Минимальные параметры Sa обеспечивают следующие материалы: «Трибоникс» и композит: вермикулит+НС+хитозан и композиция (вермикулит+хитозан+ $MgCO_3$) + Ресурс. Сталь (460 HV), упрочненная составом вермикулит + ПФС, имеет минимальную величину Sa .

Величины среднеквадратичного значения высоты поверхности ограниченного масштаба (Sq) изменяются примерно так же, как Sa в процессе триботехнических испытаний.

Величины максимальных высот пиков поверхностей ограниченного масштаба (Sp) после триботехнических испытаний (см. табл. 1) зависят как от исходной твердости стали, так и от состава использованного триботехнического материала для формирования покрытия. У закаленных неупрочненных сталей величины Sp в процессе триботехнических испытаний в условиях трения при граничной смазке возрастают примерно в 3 раза вследствие задира поверхности, а у закаленной стали наоборот – уменьшается в 1,3 раза

Большие значения Sp у модифицированных сталей объясняются образованием пиков вследствие роста кристаллитов силикатов, которые в процессе триботехнических испытаний уменьшаются, но полностью не изнашиваются. Минимальные значения Sp (меньше, чем у исходных образцов) после триботехнических испытаний наблюдаются при использовании следующих материалов: вермикулит+НС+хитозан, вермикулит+НС+резорцинформальдегидная смола и Трибоникс.

Анализ параметров профилограмм (рис. 2) модифицированных поверхностей стальных образцов после триботехнических испытаний, показал, что анизотропия геометрических характеристик по направлениям у части образцов минимальна. Композиции и композиты на основе вермикулита, модифицированного соляной кислотой, и содержащие ПФС мягкие металлы (медь, цинк, молибден и др.) или их соли обеспечивают формирование покрытий, которые после триботехнических испытаний имеют параметры шероховатости примерно такие же, как после шлифования, и намного меньше, чем у немодифицированных стальных образцов.

Величина максимальной глубины провала поверхности ограниченного масштаба (Sv) наиболее существенно возрастает в процессе триботехнических испытаний у немодифицированных сталей вне зависимости от исходной твердости вследствие образования царапин на поверхности в условиях трения при граничной смазке с наличием в ней абразива (см. табл. 1). Упрочнение сталей триботехническими материалами позволяет существенно снизить величину Sv , исключение составляет состав вермикулит+НС+хитозан, использование которого приводит к увеличению ее величины даже по сравнению с неупрочненной сталью. Глубина впадин определяется преимущественно размерами абразивных частиц, то есть высокая твердость стали (например, 460 HV) не повышает значительно стойкость поверхности трения к образованию царапин.

Величина максимальной высоты поверхности ограниченного масштаба (Sz) после триботехнических испытаний у большинства немодифицированных образцов увеличивается в 2 и более раз (см. табл. 1). Упрочнение сталей такими триботехническими материалами, как вермикулит+НС+резорцинформальдегидная смола и Трибоникс, позволяет существенно снизить величину Sz , практически до исходной вследствие уменьшения глубины и количества царапин, образующихся на поверхности в условиях трения при граничной смазке с наличием абразива в ней.

Величина среднеквадратичного градиента поверхности ограниченных размеров (Sdq) характеризует наклоны поверхности, причем чем меньше его значение, тем больше радиус неровностей. Минимальные значения Sdq обеспечивают немодифицированная сталь твердостью 460 HV и покрытие материалами Трибоникс и композит вермикулит + НС1 + резорцинформальдегидная смола.

Величина объема материала на единицу площади (Vm) в процессе триботехнических испытаний неупрочненных и модифицированных сталей (см. табл. 1) может как снижаться, так и значительно возрастать в зависимости от размера образующихся микроцарапин. Наи-

большую величину V_m среди упрочненных сталей имеет сталь, модифицированная вермикулитом. Минимальные значения V_m (меньше исходной величины) характерны для сталей, упрочненных составами: вермикулит+НСН+хитозан, вермикулит+ПФС, вермикулит+НСН+резорцинформальдегидная смола и «Трибоникс». Закалка стали снижает величину V_m как у неупрочненных, так и модифицированных сталей.

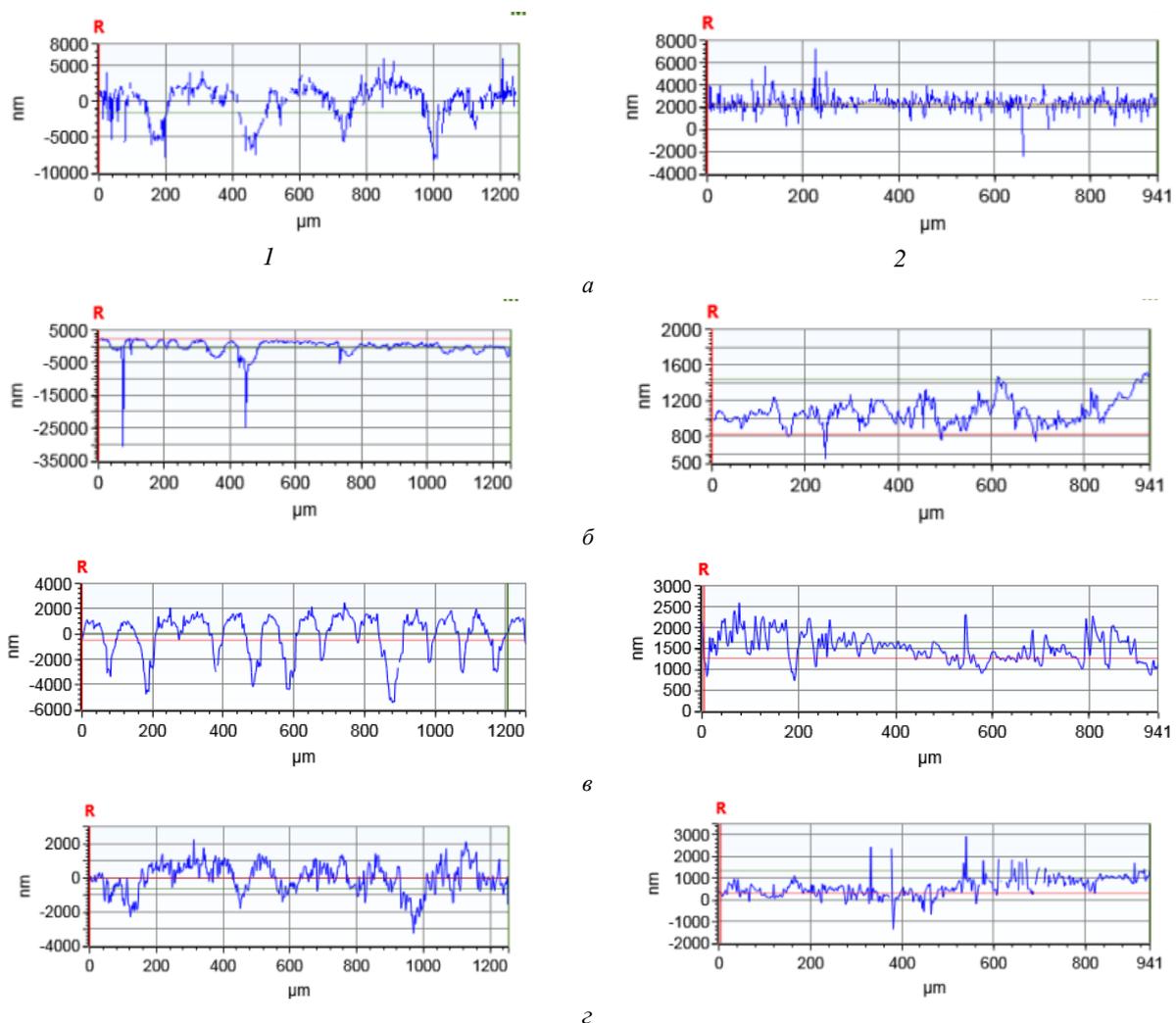


Рис. 2. Профилограммы микронеровностей поверхностей трения сталей, модифицированных составом:

а – вермикулит + хитозан + $MgCO_3$ (162 HV); б – вермикулит + HCl + хитозан (206 HV); в – вермикулит + HCl + резорцинформальдегидная смола (206 HV); г – вермикулит + ПФС (460 HV); 1 – перпендикулярно направлению вращения образца, 2 – по направлению вращения образца

Fig. 2. Profilograms of microroughnesses of friction surfaces of steels modified with the composition:
 а – vermiculite + chitosan + $MgCO_3$ (162 HV); б – vermiculite + HCl + chitosan (206 HV);
 с – vermiculite + HCl + resorcinol-formaldehyde resin (206 HV); д – vermiculite + PPS (460 HV);
 1 – perpendicular to the direction of rotation of the sample, 2 – in the direction of rotation of the sample

Величины объема пустот на единицу площади (V_v) после триботехнических испытаний (см. табл. 1) зависят как от исходной твердости стали, так и состава использованного триботехнического материала. Модифицирование закаленной стали позволяет избежать роста объема пустот на единицу площади. Для всех остальных образцов характерно значительное увеличение объема пустот на единицу площади. Так, для незакаленной и неупрочненной стали увеличение величины объема пустот на единицу площади может достигать 4,3 раза. Модифицирование стали несущественно влияет на объем пустот на единицу площади по сравнению с неупрочненной сталью.

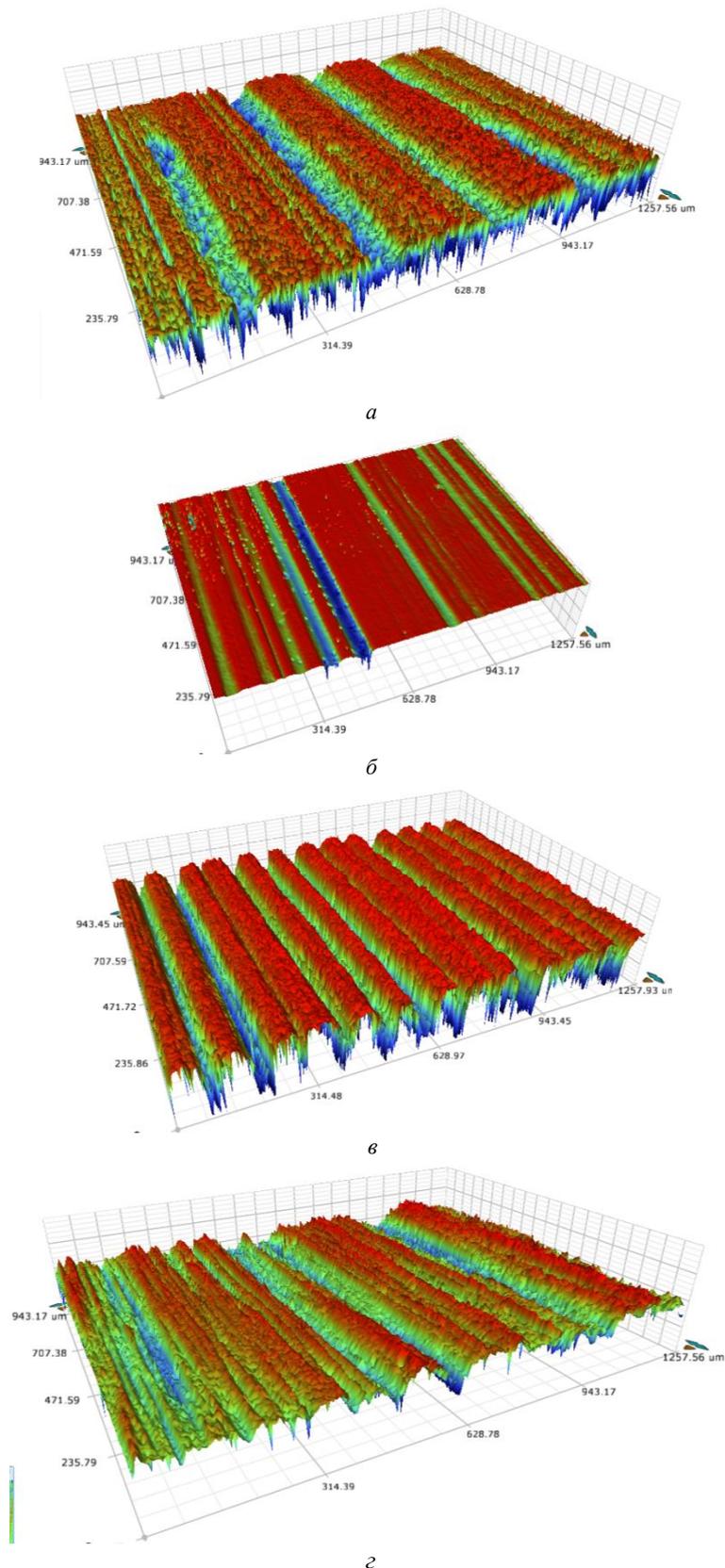


Рис. 3. Топография поверхностей трения сталей, модифицированных составом:
а – вермикулит+хитозан+MgCO₃ (162 HV); б – вермикулит+HCl+ хитозан (206 HV);
в – вермикулит+HCl+резорцинформальдегидная смола (206 HV);
г – вермикулит+ HCl+ПФС (460 HV)

Fig. 3. Topography of friction surfaces of steels modified with the following composition:
 а – vermiculite+chitosan+MgCO₃ (162 HV); б – vermiculite + HCl + chitosan (206 HV);
 в – vermiculite + HCl + resorcinol-formaldehyde resin (206 HV); г – vermiculite + HCl + PPS (460 HV)

Следует отметить, что иногда формирование металлокерамического покрытия (МКП) приводит к увеличению параметров структуры поверхности трения даже по сравнению с немодифицированными поверхностями (например, композит вермикулит+НСН+хитозан).

Модифицирование стали при использовании большинства триботехнических материалов позволяет не только значительно уменьшить параметры шероховатости, но и изменить топографию поверхности трения вследствие уменьшения высоты пиков и глубины впадин, величины объема материала на единицу площади, удаления острых пиков, благодаря чему возрастает площадь контакта и уменьшается удельное давление на контактные площадки. Следует отметить, что топография поверхности трения во многом зависит от состава модифицирующего вещества. Наиболее оптимальная топография поверхности трения у незакаленной стали формируется при использовании следующих триботехнических материалов: вермикулит+НСН+РФС, вермикулит+НСН+хитозан и Трибоникс.

Анализ влияния параметров топографии на скорости изнашивания вала и вкладыша позволил установить, что наибольшее влияние оказывают высотные параметры: по мере их увеличения скорости возрастают, особенно вкладыша.

Исследование влияния величины нагрузки и максимальной глубины отпечатка индентора ультрамикротестера позволило установить, что механические свойства поверхностного слоя неупрочненных и модифицированных сталей существенно отличаются от свойств основного металла. Причем их величины изменяются в процессе механической обработки, упрочнения и триботехнических испытаний. Например, сталь 45 (твердость основы 162 HV: после шлифования при нагрузке 19,7 мН и максимальной глубине отпечатка (0,13 мкм) нанотвердость составляет 542 HV и модуль упругости $12,0 \times 10^5$ МПа, увеличение нагрузки на инденторе до 178 мН обеспечивает глубину внедрения 106 мкм, при этом микротвердость снижается до 256 HV, а модуль упругости – до $2,7 \times 10^5$ МПа, при увеличении нагрузки до 947 мН микротвердость остается примерно такой же, как при 186 мН, однако модуль упругости снижается до $1,7 \times 10^5$ МПа, что соответствует исходному модулю стали без ее обработки. Влияние величины нагрузки и максимальной глубины на образцах после триботехнических испытаний имеет такой же характер.

Исследование влияния механических свойств покрытий на износ трибосопряжения позволило уточнить, что наибольшее влияние оказывает модуль упругости покрытия, меньшее – его твердость. Причем чем меньше величина модуля упругости, тем ниже скорость изнашивания вала.

Следует отметить, что, несмотря на повышенные значения модуля упругости при минимальных высотных параметрах и среднеквадратичного градиента поверхности ограниченных размеров структуры поверхности, обеспечиваются наименьшие величины скорости изнашивания трибосопряжения (материалы: вермикулит+НСН+резорцинформальдегидная смола и Трибоникс).

Закалка шеек вала не обеспечивает значительного уменьшения скорости ее изнашивания, а скорость изнашивания вкладыша остается примерно такой же, как и при работе в паре с закаленной сталью вследствие более длительной приработки из-за повышенной твердости [10]. Модифицирование закаленной стали обеспечивает меньший эффект снижения скорости изнашивания стали, но существенный для вкладыша.

Применение всех исследуемых триботехнических материалов обеспечивает снижение скоростей изнашивания деталей трибосопряжения «вал – вкладыш подшипника».

Большое влияние на скорость изнашивания трибосопряжения оказывает химический состав материалов, который определяет механические свойства покрытия и параметры топографии поверхности трения.

Заключение

Установлено, что на скорость изнашивания деталей трибосопряжения «коленчатый вал – вкладыш подшипника» судового среднеоборотного дизеля влияют механические свойства: наибольшее влияние оказывает модуль упругости поверхностного слоя, меньшее – его твердость, а также высотные параметры структуры поверхности.

Для повышения износостойкости деталей трибосопряжения «коленчатый вал – вкладыш подшипника» и, соответственно, их долговечности необходимо формировать на поверхности шеек тонкопленочные металлокерамические покрытия, обеспечивающие оптимальные параметры механических свойств и структуру поверхности.

Наиболее перспективные составы для формирования покрытия: вермикулит+НСН+резорцинформальдегидная смола и Трибоникс.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Макаров В.Н., Токликишвили А.Г. Триботехнические наноматериалы и надежность судовых дизелей: монография. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2020. 277 с.
2. Костецкий, Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. Поверхностная прочность материалов при трении. Киев: Техника, 1976. 296 с.
3. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. Москва: Мир, 1982. 351 с.
4. Bayer R.G., Sirico J.L. The influence of surface roughness on wear // *Wear*. 1975, vol. 35, pp. 251–260.
5. Shabia M.A., Eyre T.S. The effect of surface topography on the wear of steel // *Wear*. 1980, vol. 61, pp. 87–100.
6. Давыдов В.М., Заев В. В., Паночевный П.Н., Козаченко Ю.А., Прохорец О.В. Анализ международной практики профильной и трехмерной оценки шероховатости поверхности // Ученые записки ТОГУ. 2013. Т. 4, № 4. С. 1061–1074. EDN: RNKEND
7. Третьяков С.Д., Юльметова О.С., Филимонова Е.А. Оценка шероховатости поверхности с использованием трехмерных топографий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 56–60. EDN: SHFQIP
8. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Макаров В.Н., Молоков К.А., Болотова В.П. Влияние химического состава материала и физико-механических свойств покрытия на износостойкость трибозула «вал – покрытие – вкладыш подшипника» // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 4. С. 326–329. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-4-326-329>
9. Фадин Ю.А. Кинетика разрушения поверхности металлических материалов при трении: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург: Институт проблем машиноведения РАН, 1997. 30 с.
10. Гороховский Г.А., Граевская Л.М., Гороховская Н.К. Трибология приработки // Трение и износ. 1997. Т. 18, № 4. С. 535–542.
11. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. Москва: Физматлит, 2007. 368 с.

REFERENCES

1. Leontiev L.B., Shapkin N.P., Leontiev A.L., Makarov V.N., Toklikishvili A.G. Tribotechnical nanomaterials and reliability of marine diesel engines. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2020. 277 p. (In Russ.).
2. Kostetsky B.I., Nosovsky I.G., Karaulov A.K. Surface strength of materials under friction. Kiev, Technika Publ., 1976. 296 p. (In Russ.).
3. Chikhos H. System analysis in tribonics. Moscow, Mir Publ., 1982. 351 p. (In Russ.).
4. Bayer R.G., Sirico J.L. The influence of surface roughness on wear. *Wear*. 1975, vol. 35, pp. 251–260.
5. Shabia M.A., Eyre T.S. The effect of surface topography on the wear of steel. *Wear*. 1980, vol. 61, pp. 87–100.
6. Davydov V.M., Zaev V.V., Panochevny P.N., Kozachenko Yu.A., Prokhorets O.V. Analysis of international practice profile and three-dimensional evaluation of surface roughness. *Scientists notes PNU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1061–1074. (In Russ.).
7. Tretyakov S.D., Yulmetova O.S., Filimonova E.A. Assessment of surface roughness using three-dimensional topographies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*. 2014, vol. 57, no. 8, pp. 56–60. (In Russ.).
8. Leontiev L.B., Shapkin N.P., Makarov V.N., Molokov K.A., Bolotova V.P. Influence of the chemical composition of the material and the physical and mechanical properties of the coating on the wear

- resistance of the "shaft – coating – bearing bush" tribological coupling. *Vestnik mashinostroeniya*. 2023, vol. 102, no. 4, pp. 326–329. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-4-326-329>
9. Fadin Yu.A. Kinetics of destruction of the surface of metallic materials under friction: Abstract of Doctor's degree dissertation. Saint Petersburg, Institute of Problems of Machine Science, 1997. 30 p. (In Russ.).
 10. Gorokhovskiy G.A., Graevskaya L.M., Gorokhovskaya N.K. Tribology of run-in. *Journal of friction and wear*. 1997, vol. 18, no. 4, pp. 535–542. (In Russ.).
 11. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology. Moscow, Fizmatlish Publ., 2007. 368 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Леонтьев Андрей Львович – кандидат технических наук, министр энергетики и газоснабжения, Правительство Приморского края (Владивосток, Россия), gfi25leontev@mail.ru

Леонтьев Лев Борисович – доктор технических наук, профессор, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия), leontyev.l.b@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8072-306X>

Шапкин Николай Павлович – доктор химических наук, профессор, Институт наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия), npshapkin@gmail.com, SPIN-код: 9135-8524, <https://orcid.org/0000-0002-4287-8917>

Information about the authors

Andrey L. Leont'ev, Candidate of Engineering Sciences, Minister of Energy and Gas Supply, Government of the Primorsky Territory (Vladivostok, Russia), gfi25leontev@mail.ru

Lev B. Leont'ev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russia), leontyev.l.b@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8072-306X>

Nikolay P. Shapkin, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Institute of High Technology and Advanced Materials, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russia), npshapkin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4287-8917>

Вклад автора

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the author

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.11.2023; одобрена после рецензирования 22.11.2023; принята к публикации 15.03.2024.

Information about the article

The article was submitted November 9, 2023; approved after reviewing November 22, 2023; accepted for publication March 15, 2024.