Технология и организация судостроения и судоремонта

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-8>
УДК 621.893 : 629.5.03

Л.Б. Леонтьев, Н.П. Шапкин, В.Н. Макаров, А.Г. Токликишвили

ЛЕОНТЬЕВ ЛЕВ БОРИСОВИЧ – д.т.н., профессор, AuthorID: 760417, SPIN: 9456-5027, ORCID: 0000-0002-8072-306X, ResercherID: U-9351-2017, ScopusID: 6603944093, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

ТОКЛИКИШВИЛИ АНТОНИНА ГРИГОРЬЕВНА – к.т.н., доцент, SPIN: 1578-2063, e-mail: Toklikishviligg@yandex.ru

Кафедра сварочного производства Инженерной школы

ШАПКИН НИКОЛАЙ ПАВЛОВИЧ – д.х.н., профессор, AuthorID: 55596, SPIN: 9135-8524, ORCID: 0000-0002-4287-8917, ResercherID: I-2935-2014, ScopusID: 6603925928, e-mail: npshapkin@gmail.com

Кафедра неорганической и элементоорганической химии Школы естественных наук

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул. 8, Владивосток, Россия, 690091

МАКАРОВ ВАСИЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ – начальник слесарно-механического участка корпусно-докового цеха, e-mail: makarov_vasily@mail.ru

АО «Центр судоремонта Дальзавод»

Дальзаводская ул. 2, Владивосток, Россия, 690001

Выбор органо-неорганических материалов для упрочнения шеек коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей

Аннотация: Приведены обобщающие результаты исследований триботехнических свойств сопряжения «коленчатый вал–покрытие–вкладыш» судового среднеоборотного дизеля, которые проводили авторы данной статьи в течение 8 лет. На основании полученных результатов для повышения долговечности подшипников коленчатых валов авторы предлагают формировать износостойкие тонкопленочные металлокерамические покрытия на шейках вала, которые получают методом трибомодификации поверхности природными и искусственными слоистыми силикатами.

Впервые приведен химический состав конкретных триботехнических материалов. Установлено, что, изменяя их химический состав и структуру, можно повышать долговечность трибосопряжения в большом диапазоне за счет оптимизации параметров состава, структуры, топографии, твердости и модуля упругости покрытия. Результаты исследования могут быть использованы для упрочнения шеек коленчатых валов при капитальном ремонте дизелей.

Ключевые слова: долговечность, подшипник, коленчатый вал, дизель, триботехнический материал, покрытие, износостойкость.

Введение

Надежность современных судовых среднеоборотных дизелей по мере их форсирования, снижения удельной массы и роста экономичности все более ограничивается надежностью подшипников скольжения коленчатых валов. Среди факторов, отрицательно влияющих на работоспособность подшипников, следует отметить повышение температуры масла и снижение его вязкости, применение масел с высоким содержанием щелочных присадок, обладающих пони-

женными противозадирными свойствами. Повышенный износ или задиры шеек коленчатого вала приводит к необходимости капитального ремонта всего двигателя, шлифованию шеек и переходу на ремонтный размер вала и вкладышей подшипников. Чтобы повысить долговечность коленчатых валов и снизить затраты на ремонт двигателей, необходимо упрочнять шейки для снижения скорости их изнашивания в моменты пуска и остановки дизеля, а также при работе на переходных режимах, когда не обеспечивается режим трения при гидродинамической смазке.

Решение проблемы повышения триботехнических характеристик подшипников и, соответственно, их долговечности связано с формированием тонкопленочных износостойких покрытий на поверхностях трения коленчатых валов при капитальном ремонте дизеля или путем введения трибоактивных присадок в смазку в процессе эксплуатации [5].

В настоящее время для модифицирования поверхностей трения применяется большое количество различных триботехнических материалов, которые способны формировать износостойкие тонкопленочные покрытия. По структуре и свойствам основных активных компонентов, оказывающих позитивное воздействие на трение и изнашивание, следует выделить следующие материалы:

- мягкие металлы и сплавы (медь, молибден, цинк, бронза и др.) [2, 3],
- на основе серпентинита [2, 3, 7, 8],
- композиции на основе природных силикатов [1, 10], глинистых материалов [6],
- композиции на основе политетрафторэтилена [4, 10] и наноалмазов [9],
- композиции, содержащие оксид меди и дисульфид молибдена [7] и др.

Однако следует отметить, что несмотря на глубокие и обстоятельные исследования в области применения функциональных триботехнических материалов для повышения долговечности трибоузлов, выбор оптимального триботехнического материала (ТМ) для конкретных условий практически невозможен, так как отсутствуют соответствующие рекомендации. Кроме того, эти исследования выполнены для различных условий эксплуатации и по различным методикам. Поэтому для оценки триботехнических свойств различных типов ТМ необходимо провести сравнительные испытания по единой методике, адаптированной авторами для данного трибоузла. Нами установлено, что при формировании износостойких тонкопленочных покрытий путем трибомодификации поверхностей трения как в процессе штатной эксплуатации двигателей, так и при ремонте коленчатых валов [5, 12] технологические затраты минимальные.

Цель работы — определение группы органо-неорганических триботехнических материалов на основе вермикулита, глины и искусственных материалов, обеспечивающих максимальную эффективность их применения для модифицирования шеек коленчатых валов судовых дизелей, чтобы повысить износостойкость и долговечность трибоузла.

Материалы и методы исследований

Для исследования эксплуатационных свойств тонкопленочных износостойких покрытий, формируемых на поверхностях трения стали путем трибомеханической модификации, в течение 8 лет исследований нами разработаны 17 органо-неорганических триботехнических материалов из 4 групп — природные и искусственные полимеры, из которых было изготовлено свыше 20 композиций и композитов (рис. 1).

В качестве базовых материалов для изготовления композиций и композитов были взяты слоистые силикаты: вермикулит и глинистые минералы, поскольку имеют невысокую стоимость и широко применяются в строительстве. Для уменьшения абразивных свойств часть слоистых силикатов подвергали модифицированию соляной кислотой [11]. Часть слоистых силикатов и композитов на их основе для изменения свойств прокаливали при температуре 600–700 °С. Для улучшения триботехнических свойств мелкодисперсные частицы слоистых силикатов плакировали природными и искусственными полимерами. Химический состав некоторых ТМ приведен в табл. 1.

Рис. 1. Материалы, использованные в исследованиях эксплуатационных свойств трибосопряжения «вал+покрытие–вкладыш подшипника», выполненных авторами на протяжении 8 лет.

Исходный вермикулит имеет слоистую структуру. После механической его активации размер частиц составляет примерно 5 мкм. При обработке кислотой уменьшаются размеры частиц до 6–40 нм, а кристаллическая структура вермикулита разрушается и становится аморфной [5].

При модификации вермикулита в растворах, содержащих ПФС или целлюлозу, происходит образование покрытия молекулярного характера.

Полифенилсилоксан (ПФС) имеет стабильный химический состав $[C_6H_5SiO_{1,5}]_n$ и слоистую структуру. Кроме того, обеспечивается возможность плакирования частиц вермикулита и каолинита силоксаном для его модифицирования и снижения абразивных и улучшения триботехнических свойств. При этом создается минеральная силикатная основа, на

которой формируется полимерное силикатное покрытие. Композиты, содержащие ПФС, обладают высокой адгезией к металлам.

Триботехнические испытания проводились на универсальной машине трения модели УМТВК по схеме «ролик–колодка» в условиях граничного трения при постоянной скорости скольжения 0,63 м/с. В качестве неподвижного образца использовались колодки, вырезанные из вкладыша типа *Rillenlager (Miba 33)*, который имеет регулярный микрорельеф в виде винтовой канавки глубиной 16–40 мкм и шагом около 0,15 мм на всей поверхности трения, что обеспечивает высокую усталостную прочность и способность выдерживать высокие удельные нагрузки. Диски для упрочнения были взяты из стали 40Х твердостью 230 НВ, так как свыше 80% коленчатых валов судовых дизелей имеют твердость шеек в диапазоне 201–230 НВ.

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.

Нагрузку при формировании покрытия и трибоиспытаниях изменяли в соответствии с режимами, приведенными в табл. 2. Время формирования покрытия и трибоиспытаний каждой пары трения составляло 1 час.

Таблица 1

Элементный состав исследуемых материалов

Триботехнический материал для формирования покрытия	Содержание элементов, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Другие
Вермикулит исходный	42,72	11,81	8,74	24,52	0,14	5,75	0,85	5,47
Вермикулит + HCl	89,63	5,18	0,34	1,06	0,36	1,01	0,17	2,25
Каолинит исходный	39,0	56,1	1,97	1,59	0,80	0,2	–	0,34
Каолинит + ТО	37,3	58,2	1,83	1,57	0,65	0,2	–	0,25
Каолинит + HCl	41,6	55,6	1,42	–	0,87	–	–	0,51
Каолинит ТО + HCl	68,9	28,8	1,01	–	0,65	–	–	0,64
Нонтронит	36,56	36,64	14,24	1,61	9,48	–	–	1,47
Нонтронит + ТО	33,39	39,36	13,81	2,41	9,44			1,50

Примечание. ТО – прокаливание при температуре 600–700 °С в течение 1 часа.

Таблица 2

Режимы формирования покрытия и триботехнических испытаний

Нагрузка, Н	100	200	400
Время формирования покрытия, мин	5	10	45
Время трибоиспытаний, мин	5	10	45

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

Результаты эксперимента и их обсуждение

Поиск оптимального химического состава триботехнических материалов для формирования износостойких покрытий на поверхностях трения деталей для решения задачи повышения их износостойкости осуществляли в несколько этапов. Исследовали триботехнические свойства исходных материалов, затем выбирали перспективные материалы и из них создавали композиции или композиты, оптимизировали содержание исходных материалов в составе композиции. Окончательное решение о перспективности применения триботехнического материала принимали после проведения триботехнических испытаний и анализа эф-

фективности сформированных на их основе металлокерамических покрытий для конкретных условий эксплуатации. В качестве основного критерия при выборе материала были взяты скорости изнашивания шейки вала и вкладыша подшипника, которые определяют долговечность сопряжения.

Проведенные комплексные исследования различных групп природных и искусственных органо-неорганических триботехнических материалов позволили нам установить, что они существенно отличаются по химическому составу, структуре, физическим характеристикам и, соответственно, по их эксплуатационным свойствам. Химический состав, структуру, физико-механические характеристики природных слоистых силикатов можно изменять путем модифицирования их соляной кислотой, а также искусственными полимерами для плакирования поверхности частиц силикатов и межплоскостного пространства.

Проведенные нами сравнительные исследования различных органо-неорганических ТМ, позволили установить, что большинство слоистых силикатов обладают высокими абразивными свойствами, которые оказывают существенное влияние на скорость изнашивания на этапах нанесения их на поверхность трения и формирования покрытия, а также в процессе триботехнических испытаний.

Ранее нами установлено, что формирование износостойкого металлокерамического покрытия на поверхности трения при фрикционном методе обработки путем подачи смазочной композиции, содержащей ТМ, происходит в результате протекания следующих процессов [4].

1. Во время первой технологической операции (нанесение модифицирующего материала на поверхность трения) преимущественно протекают процессы очистки поверхности от загрязнений в результате абразивного изнашивания и нагартовки частиц ТМ во впадины микронеровностей (время операции 3–6 мин). Пятна покрытия появляются преимущественно только в местах выступов микронеровностей.

2. Во время второй технологической операции происходят процессы абразивного изнашивания и формирование износостойкого покрытия (время, необходимое для образования покрытия, составляет 35–45 мин). Предыдущая операция обеспечила контакт частиц композиции с ювенильной поверхностью упрочняемого металла. Необходимая энергия для прохождения формирования металлокерамического слоя — это энергия трения. В результате диффузионных, ионозамещающих, металлургических и ротационных процессов в углублениях и на выступах микрорельефа образуются кристаллы металлокерамики, которые и составляют износостойкий защитный слой, параметры шероховатости уменьшаются, т.е. происходит выравнивание микрогеометрии поверхности трения детали.

На этапе нанесения триботехнических материалов на незакаленную сталь происходит ее интенсивное изнашивание (табл. 3), причем 43,4% ТМ характеризуются более выраженными (по сравнению с другими этапами) абразивными свойствами:

- наиболее высокие свойства (скорость изнашивания ≥ 60 мг/ч): вермикулит, композиты вермикулит + ПФС и каолинит + ПФС + ТО и другие ТМ;
- высокие (скорость изнашивания 43–59 мг/ч): композиция вермикулит + 50% ПТФЭ, композит (вермикулит + HCl) + полиэтилен, каолинит + HCl и другие ТМ;
- средние (скорость изнашивания 20–40 мг/ч): композиты (вермикулит + HCl) + хитозан, (вермикулит + HCl) + ПФС, каолинит + ТО + HCl и другие ТМ;
- низкие абразивные свойства (скорость изнашивания < 20 мг/ч): 56,6% ТМ: ПТФЭ ($V_{и} = 0$ мг/ч), композит (вермикулит + HCl) + резорцинформальдегидная смола ($V_{и} = 8$ мг/ч), вермикулит + HCl ($V_{и} = 10$ мг/ч), композиты (вермикулит + HCl) + полистирол и (вермикулит + HCl) + целлюлоза + ТО ($V_{и} = 16$ мг/ч), (вермикулит + HCl) + целлюлоза ($V_{и} = 2$ мг/ч) и др.

Таблица 3

Абразивные свойства органо-неорганических триботехнических материалов на этапах нанесения на поверхность трения незакаленной стали и формирования покрытия

Степень абразивности ТМ	Нанесение материала*		Формирование покрытия**	
	Скорость изнашивания, мг/ч	Количество материалов, %	Скорость изнашивания, мг/ч	Количество материалов, %
Очень высокая	≥ 60	10,0	$> 4,0$	10,0
Высокая	41–59	16,7	2–4	26,7
Средняя	20–40	16,7	1,0–1,9	30,0
Низкая	< 20	56,6	< 1	33,3

* Нанесение смазки с ТМ в течение 3 мин.

** Формирование покрытия без ТМ в течение 1 часа.

На этапе формирования тонкопленочного износостойкого покрытия на незакаленной стали скорость ее изнашивания существенно снижается (табл. 3) вследствие отсутствия поступления ТМ в зону трения. Однако влияние состава и свойств модифицирующего материала велико, поэтому скорость изнашивания изменяется в широком диапазоне: от 0,1 мг/ч (композиция (вермикулит + HCl) + производная молибдена) до 5,3 мг/ч (композит каолинит + ПФС + ТО).

Скорости изнашивания следующие:

- наиболее высокая ($V_{и} > 4$ мг/ч) при формировании покрытия – 10% ТМ: композиции 10% (вермикулит + HCl) + 90% ПФС и (вермикулит + HCl) + хитозан, а также композит (каолинит + ПФС + ТО);

- высокая ($V_{и} = 2–4$ мг/ч) – 26,7% ТМ: вермикулит ($V_{и} = 3,4$ мг/ч), композиты: вермикулит + ПТФЭ ($V_{и} = 2,8$ мг/ч) и (вермикулит + HCl) + полиэтилен ($V_{и} = 2,3$ мг/ч), композиция вермикулит + 50% ПТФЭ ($V_{и} = 2,2$ мг/ч) и др.;

- средняя ($V_{и} = 1,0–1,9$ мг/ч) – 30% ТМ: вермикулит + HCl ($V_{и} = 1,7$ мг/ч), каолинит + HCl ($V_{и} = 1,5$ мг/ч), композиция (вермикулит + HCl) + хитозан ($V_{и} = 1,5$ мг/ч), нонтронит + ТО ($V_{и} = 1,2$ мг/ч) и др.;

- низкая ($V_{и} < 1$ мг/ч) – 33,3% ТМ: ПТФЭ ($V_{и} = 0,3$ мг/ч), стеарат никеля ($V_{и} = 0,1$ мг/ч), композиты (вермикулит + HCl) + целлюлоза ($V_{и} = 0,1$ мг/ч) и (вермикулит + HCl) + производная молибдена ($V_{и} = 0,1$ мг/ч), (вермикулит + HCl) + полистирол ($V_{и} = 0,1$ мг/ч).

Анализ факторов, влияющих на величину скорости изнашивания стали на этапах нанесения триботехнического материала и формирования покрытия, показал, что наиболее значимыми являются: химический состав (преимущественно количество окиси алюминия), размер частиц для природных или сферолита для искусственных силикатов и величина их удельной поверхности. Последнее объясняется следующим: с увеличением размера частиц происходит возрастание скорости, так как на данных этапах превалирует абразивный эффект, который приводит к разрушению частиц, их взаимодействию с поверхностью трения и частичному разрушению, а также перемешиванию с металлом поверхностного слоя и диффузии элементов легирующего материала в поверхностный слой. Увеличение величины удельной поверхности частиц уменьшает их прочность и, соответственно, ускоряет процесс их разрушения. Вследствие данных процессов формируется тонкопленочное металлокерамическое покрытие, структура которого значительно влияет на скорость этого гетерогенного процесса, а соответственно, и на коэффициент трения в процессе триботехнических испытаний. Для уменьшения абразивных свойств алюмосиликатов содержание окиси алюминия следует ограничивать (для вермикулита оптимальное содержание окиси алюминия составляет 5–6%), размер частиц алюмосиликатов не должен превышать 80–100 нм.

Анализ результатов проведенных авторами триботехнических испытаний (рис. 2) показал, что применительно к узлу трения «коленчатый вал–покрытие–вкладыш подшипника» исследуемые ТМ можно разделить на несколько групп:

1) значительно уменьшают скорости изнашивания вала по сравнению с парой трения с неупрочненным валом ($V_{\text{п}} \leq 0,8$ мг/ч) и вкладыша ($V_{\text{вкл}} \leq 5$ мг/ч) (область 1 на рис. 1) – 32,3% от всех исследуемых ТМ;

2) значительно уменьшают скорость изнашивания вала и несколько снижают скорость изнашивания вкладыша ($V_{\text{п}} \leq 0,8$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 5\text{--}10$ мг/ч) – 11,8%;

3) значительно уменьшают скорость изнашивания вала, но увеличивают скорость изнашивания вкладыша по сравнению с парой трения с неупрочненным валом ($V_{\text{п}} \leq 0,5$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} > 10,5$ мг/ч) – 23,5%;

4) значительно уменьшают скорость изнашивания вкладыша и незначительно снижают скорость изнашивания вала ($V_{\text{п}} > 0,8$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} < 5$ мг/ч) – 8,8%;

5) незначительно уменьшают скорости изнашивания вала и вкладыша ($V_{\text{п}} > 0,8$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 5\text{--}10$ мг/ч) – 5,9%;

6) незначительно уменьшают скорость изнашивания вала и существенно увеличивают скорость изнашивания вкладыша по сравнению с парой трения с неупрочненным валом ($V_{\text{п}} > 0,8$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} > 10,5$ мг/ч) – 11,8% от всех исследуемых ТМ.

Рис. 2. Величины скоростей изнашивания поверхностей сопряжения «диск 40Х–вкладыш подшипника Miba № 33» для различных покрытий диска
($V_{\text{вкл}}$ – скорость изнашивания вкладыша;
 $V_{\text{п}}$ – скорость изнашивания покрытия вала):
1 – область оптимальных величин скоростей изнашивания поверхностей сопряжения;
2 – средняя скорость изнашивания вкладыша при трении с неупрочненной сталью;
3 – средняя скорость изнашивания неупрочненного стального диска. Каждая точка – результат нескольких экспериментов для каждого из материалов, выполненных на протяжении 8 лет (см. рис. 1).

Наиболее перспективными ТМ для повышения долговечности сопряжения «коленчатый вал–вкладыш» следует считать те, которые обеспечивают минимальные скорости изнашивания обеих сопряженных поверхностей (область 1 на рис. 2) и позволяют увеличить износостойкость узла в 4–10 раз. Следует отметить, что ТМ из второй группы обеспечивают высокую износостойкость шеек коленчатого вала при меньшей скорости изнашивания вкладышей по сравнению с неупрочненным валом, т.е. 44,1% всех ТМ (группы первая и вторая) могут успешно применяться для повышения долговечности сопряжения «коленчатый вал–вкладыш подшипника».

Большинство материалов третьей группы ТМ обеспечивают высокую износостойкость шеек коленчатого вала при скорости изнашивания вкладышей близкой к скорости изнашивания вкладышей, работающих в паре с неупрочненным валом (рис. 1).

ТМ четвертой и пятой групп применять нецелесообразно вследствие низкой эффективности для повышения долговечности сопряжения «коленчатый вал–вкладыш подшипника».

ТМ шестой группы опасно применять вследствие больших скоростей изнашивания антифрикционного покрытия вкладышей. Повышенный износ антифрикционного слоя вкладышей приводит к необходимости более частой их замены на двигателе и высокой вероятности схватывания и задира шеек коленчатого вала.

К первой группе относятся следующие ТМ: композит (вермикулит + HCl) + 9%ПФС + ТО ($V_{\text{п}} = 0,1$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 1,9$ мг/ч), нонтронит + ТО ($V_{\text{п}} = 0,3$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 3,9$ мг/ч), композиция (вермикулит + HCl) + производная молибдена ($V_{\text{п}} = 0,6$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 1,7$ мг/ч), композит вермикулит + ПТФЭ ($V_{\text{п}} = 0,8$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 1,2$ мг/ч), вермикулит ($V_{\text{п}} = 0,6$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 3,5$ мг/ч) и другие ТМ.

Ко второй группе относятся следующие ТМ: вермикулит + HCl ($V_{\text{п}} = 0,1$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 6,2$ мг/ч), стеарат никеля ($V_{\text{п}} = 0,1$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 6,8$ мг/ч), композиция вермикулит + 50% ПТФЭ ($V_{\text{п}} = 0,8$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 1,2$ мг/ч).

К третьей группе относятся следующие ТМ: композиты (вермикулит + HCl) + резорцинформальдегидная смола ($V_{\text{п}} = 0,1$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 11,0$ мг/ч), каолинит + ПФС + ТО ($V_{\text{п}} = 0,5$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 12,0$ мг/ч), алюминийфенилсилоксан ($V_{\text{п}} = 0,6$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 15,4$ мг/ч).

К четвертой группе относятся следующие ТМ: композиты (вермикулит + HCl) + MgCO_3 ($V_{\text{п}} = 1,5$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 1,2$ мг/ч), (вермикулит + HCl) + целлюлоза ($V_{\text{п}} = 1,9$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 1,9$ мг/ч).

К пятой группе относятся следующие ТМ: композит (вермикулит + HCl) + целлюлоза + ТО ($V_{\text{п}} = 1,2$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 8,4$ мг/ч), каолинит + ТО + HCl ($V_{\text{п}} = 1,4$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 3,5$ мг/ч).

К шестой группе относятся следующие ТМ: композиты вермикулит + полиэтилен ($V_{\text{п}} = 0,9$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 29,8$ мг/ч), никельфенилсилоксан ($V_{\text{п}} = 1,8$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 32,5$ мг/ч), (вермикулит + HCl) + полиэтилен ($V_{\text{п}} = 2,3$ мг/ч, $V_{\text{вкл}} = 11,9$ мг/ч).

Анализ износостойкости металлокерамических покрытий, формируемых на поверхности трения стальных деталей трибоузла «вал + покрытие–вкладыш», показал, что наибольшее влияние оказывают химический состав ТМ и его структура, которые, в свою очередь, определяют физико-механические и триботехнические свойства покрытия. Максимальная износостойкость покрытия обеспечивается путем формирования максимальной твердости при минимальных модуле упругости и коэффициенте трения. Изменяя химический состав и структуру ТМ путем их модифицирования или создания композиций и композитов на основе вермикулита, а также применения искусственных препаратов или композитов совместно с природными, можно получить механические свойства покрытия в широком диапазоне: твердость 352–822 HV, модуль упругости $(1,78\text{--}15,22) \times 10^5$ Н/мм².

Повысить износостойкость покрытия и уменьшить коэффициент трения можно путем плакирования алюмосиликатов и заполнения межплоскостного его пространства ПФС, при этом коэффициент трения снижается в несколько раз, а скорость изнашивания вкладыша – в 3 раза.

Коэффициент трения при работе пары трения без металлокерамического покрытия на стали в условиях граничной смазки характеризуется большими значениями величин и их колебаниями ($k_{\text{тр}} = 0,280\text{--}0,106$, средняя величина 0,079). Формирование металлокерамических покрытий на стали в условиях граничной смазки позволяет существенно уменьшить коэффициент трения при использовании большинства исследованных ТМ. Например, применение полимагнийфенилсилоксана позволяет получить $k_{\text{тр}} = 0,004$; композитов (вермикулит + HCl) + 9%ПФС + ТО и (вермикулит + HCl) + резорцинформальдегидная смола ($k_{\text{тр}} = 0,007$); нонтронит + ТО, композитов (вермикулит + HCl) + целлюлоза и вермикулит + HCl) + ПФС $k_{\text{тр}} = 0,014$.

Применение слоистых алюмосиликатов и их модифицированных форм для формирования покрытий не влияет на температуру в зоне трения, исключение составляет ПФС, который приводит к ее увеличению.

Модифицирование стали любым из исследуемых триботехнических материалов и формирование покрытия позволяет значительно уменьшить высотные параметры у незакаленных сталей более чем в 2 раза.

В результате трибомодификации поверхности трения на глубине до 0,25 мм наблюдается повышенное содержание легирующих элементов, входящих в состав трибоматериала. Металлокерамическое покрытие на поверхности трения характеризуется минимальным содержанием железа (всего 8,2%) и большим — элементов углерода, кислорода и кремния. Толщина покрытия находится в пределах 6,0–7,5 мкм, в среднем 6,7 мкм (рис. 3).

Рис. 3. Микроструктуры поверхностного слоя стали 40Х после трибомодифицирования составом «Трибоникс».

Таким образом, ТМ могут быть весьма эффективными для упрочнения шеек коленчатых валов дизелей, так как обеспечивают повышение долговечности сопряжения «коленчатый вал–покрытие–вкладыш подшипника» и уменьшение потерь на трение, а также для снижения ресурса трибосопряжения.

Выводы

Триботехнические испытания большой группы триботехнических материалов позволили установить следующее:

- природные слоистые силикаты обладают высокими абразивными свойствами, которые оказывают существенное влияние как на этапах нанесения на поверхность трения и формирования покрытия, так и в процессе триботехнических испытаний;
- большинство материалов обеспечивает существенное уменьшение скорости изнашивания стального образца;
- композиции и композиты на основе модифицированного вермикулита обладают наилучшими триботехническими характеристиками;
- наиболее перспективными материалами для повышения износостойкости и долговечности сопряжения «шейка коленчатого вала–вкладыш подшипника» судовых среднеоборотных дизелей являются следующие наноструктурированные материалы: композит (вермикулит + HCl) + 9% ПФС + ТО, нонтронит, композиция (вермикулит + HCl) + производная молибдена, вермикулит + 50% ПТФЭ, вермикулит, модифицированный кислотой, композиция вермикулит + 50 % ПТФЭ, композиты: вермикулит, последовательно модифицированный кислотой и резорцинформальдегидной смолой; вермикулит, модифицированный кислотой и ПФС и последующим прокаливанием.

В дальнейшем авторы предполагают исследовать новые группы искусственных триботехнических материалов, растворимых в смазочном масле, используемом для судовых дизелей.

Вклад авторов в статью: Л.Б. Леонтьев – обобщение материала авторских исследований, текст, структура статьи; Н.П. Шапкин – разработка и изготовление триботехнических материалов; В.Н. Макаров – проведение триботехнических испытаний (вместе с А.Г. Токликишвили) и анализ опубликованных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубева О.Ю., Юдин В.Е., Диденко А.Л., Светличный В.М., Гусаров В.В. Нанокompозиты на основе слоистых силикатов и полиамидных термопластов и магниево-силикатных наночастиц со структурой монтмориллонита // Журнал прикладной химии. 2007. Т. 80, № 1. С. 106–110.
2. Дунаев А.В., Ладиков В.В., Пустовой И.Ф., Голубев И.Г. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК. М.: Росинформагротех, 2014. 164 с.
3. Колокатов А.М. Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 215 с.

4. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Макаров В.Н. Особенности формирования износостойкого металлокерамического покрытия на поверхностях трения стальных деталей // Металлообработка. 2014. № 6(84). С. 41–51.
5. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Макаров В.Н. Триботехнические свойства тонкопленочных покрытий, полученных трибомодификацией шеек коленчатых валов судовых дизелей // Трение и износ. 2016. Т. 37, № 6. С. 685–692.
6. Любимов Д.Н., Долгополов К.Н., Козаков А.Т., Никольский А.В. Улучшение эксплуатационных свойств смазочных материалов применением добавок глинистых минералов // Трение и износ. 2011. Т. 32, № 6. С. 585–595.
7. Погодаев Л.И. Влияние геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 1. С. 58–66.
8. Погодаев Л.И., Кузьмин А.А. Структурно-энергетические модели надежности материалов и технических средств. СПб.: СПГУВК, 2010. 123 с.
9. Селютин Г.Е., Пузырь А.П., Ворошилов В.А., Бондарь В.С. Применение модифицированных наноалмазов для увеличения времени работы узлов трения // Труды ГОСНИТИ. 2010. № 106. С. 205–245.
10. 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.
11. Шапкин Н.П., Леонтьев Л.Б., Макаров В.Н., Хальченко И.Г., Короченцев В.В., Шкуратов А.Л. Органосиликатные антифрикционные композиты на основе вермикулита для формирования покрытий на поверхностях трения стальных деталей // Журнал прикладной химии. 2014, Т. 87, вып. 12. С. 1727–1734.
12. Leont'ev L.B., Shapkin N.P., Makarov V.N. The selection of tribological materials for durability crankshaft bearings of marine diesel engines. Materials of International Scientific Conference *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration*. Part 4, Beijing, China, 2019, p. 194–202.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 1/42

Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-8>

Leont'ev L., Shapkin N., Makarov V., Toklikishvili A.

LEV LEONT'EV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, ORCID: 0000-0002-8072-306X,

ResercherID: U-9351-2017, ScopusID: 6603944093, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

ANTONINA TOKLIKISHVILI, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

e-mail: Toklikishviligg@yandex.ru

Department of Welding, School of Engineering

NIKOLAY SHAPKIN, Doctor of Chemical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0002-4287-8917,

ResercherID: I-2935-2014, ScopusID: 6603925928, e-mail: npshapkin@gmail.com

Department of Inorganic and Organic Chemistry, School of Natural Sciences

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

VASILY MAKAROV, Head of the Mechanical-mechanical Section of the Hull-dock Workshop,

Dalzavod Ship Repair Center JSC, e-mail: makarov_vasily@mail.ru

2 Dalzavodskaya St., Vladivostok, Russia, 690001

Selection of organo-inorganic materials for hardening of crankshafts necks of marine medium-speed diesel engines

Abstract: The present paper presents the results of studies of tribotechnical properties of *crankshaft – cover – the neck shaft* conjugation of a medium-speed marine diesel engine. In order to increase durability of crankshaft bearings it is proposed to form wear-resistant thin-film ceramic metal coat-

ings on shaft necks, which can be obtained by method of surface tribomodification by natural and artificial layered silicates.

Chemical composition of some tribotechnical materials is given for the first time. It was found that by changing the chemical composition and structure of tribotechnical materials, it is possible to increase the durability of triboscreating in a large range due to optimization of parameters of composition, structure, topography, hardness and modulus of elasticity of the coating. The results of investigation can be used for hardening of crankshafts necks during the overhaul of diesel engines.

Keywords: durability, bearing, crankshaft, diesel, tribotechnical material, coating, wear resistance, repairs.

REFERENCES

1. Golubeva O.Yu., Yudin V.E., Didenko A.L., Svetlichny V.M., Gusarov V.V. Nanokompozita's on the basis of layered silicates and polyamide thermoplastics and magnesium-silicate nanoparticles with structure of montmorillonite. *Log of Applied Chemistry*. 2007;80(1):106–110.
2. Dunayev A.V., Ladikov V.V., Pustovoy I.F., Golubev I.G. Efficiency of use of mineral modifiers at technical service in HSC. M., Rosinformagrotekh, 2014, 164 p.
3. Kolokatov A.M. Repair and recovery structures for increase in a resource of machines. M., RGAU-MSHA publishing house, 2016, 215 p.
4. Leontiev L.B., Shapkin N.P., Leontyev A.L., Makarov V.N. Features of the formation of wear-resistant cermet coating on the friction surfaces of steel parts. *Metalworking*. 2014(84):41–51.
5. Leontyev L.B., Shapkin N.P., Leontyev A.L., Makarov V.N. Tribotechnical properties of the thin-film coverings received by a tribomodifikation of necks of bent shafts of ship diesels. *Friction and Wear*. 2016;37(6):685–692.
6. Lyubimov D.N., Dolgoplov K.N., Kozakov A.T., Nikolsky A.V. Improvement of operational properties of lubricants by use of additives of clay minerals. *Friction and Wear*. 2011;32(6):585–595.
7. Pogodayev L.I. Influence of geomodifiers of friction on operability of tribological conjugations. *Problems of mechanical engineering and reliability of machines*. 2005(1):58–66.
8. Pogodayev L.I., Kuzmin A.A. Structural and power models of reliability of materials and technical means. SPb., SPGUVK, 2010, 123 p.
9. Selyutin G.E., Puzir A.P., Voroshilov V.A., Bondar V.S. Application of the modified nanodiamonds for increase in operating time of frictional units. *GOSNITI Proceedings*. 2010(106):205–245.
10. Usachev V.V., Pogodayev L.I., Telukh D.M., Kuzmin V.V. Introduction to a problem of use of natural layered geomodifiers in the tribological conjugations. *Friction and Lubricant in Machines and Mechanisms*. 2010(1):36–42.
11. Shapkin N.P., Leontiev L.B., Makarov V.N., Halchenko I.G., Korochentsev V.V., Shkuratov A.L. Vermiculite-based organosilicate antifriction composites for forming coatings on the friction surfaces of steel parts. *J. of Applied Chemistry*. 2014;87(12):1727–1734.
12. Leontief L.B., Shapkin N.P., Makarov V.N. The selection of tribological materials for durability crankshaft bearings of marine diesel engines. *Materials of International Scientific Conference Scientific research of the SCO countries: synergy and integration*. Part 4, Beijing, China, 2019, p. 194–202.