
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.793:621.893

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕРМИКУЛИТА
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ФОРМИРУЕМЫХ ПОКРЫТИЙ**© 2020 г. Л. Б. Леонтьев^{1,*}, Н. П. Шапкин¹, А. Л. Леонтьев¹¹*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия***e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru*

Поступила в редакцию 21.04.2020 г.

Принята к публикации 29.07.2020 г.

В статье представлены авторские исследования влияния состава и структуры трибо-технических материалов на основе вермикулита, используемых для формирования тонкопленочных покрытий на стали 40Х, на эксплуатационные свойства трибосо-пряжения “коленчатый вал–вкладыш подшипника” судового среднеоборотного ди-зеля. Для изменения состава, структуры и свойств исходных слоистых силикатов их подвергали модификации кислотой и различными полимерами, вследствие этого изменялись эксплуатационные свойства формируемых тонкопленочных металлоке-рамических покрытий.

Ключевые слова: вермикулит, химический состав, структура, модифицирование, сталь, покрытие, механические свойства, износ

DOI: 10.31857/S023571192006005X

Поверхностный слой деталей в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильному механическому, тепловому, коррозионному и другим воздействиям. Отказ детали и необходимость в ее замене возникает в большинстве случаев из-за разруше-ния ее поверхностного слоя вследствие абразивного, усталостного, коррозионного и других видов изнашивания. Обеспечить заданную долговечность трибоузлов машин, механизмов и оборудования можно путем получения оптимальных эксплуатационных свойств поверхностного слоя сопряженных деталей.

Решение проблемы радикального повышения долговечности трибосопряжений связано с применением новых ресурсосберегающих технологий, таких как формиро-вание композитных тонкопленочных износостойких покрытий путем использования слоистых силикатов добавляемых в смазку в процессе эксплуатации или в результате фрикционно-механического воздействия при упрочнении поверхностей трения дета-лей при их изготовлении или восстановлении, позволяющих получать оптимальный комплекс параметров материала поверхностного слоя со свойствами, существенно от-личающимися от свойств металла детали [1–7]. Новое качество поверхностного слоя де-тали обеспечивает существенное повышение ресурса трибоузла, в который она входит.

Природные и синтетические слоистые силикаты, в том числе и вермикулит, в настоя-щее время широко применяются в качестве присадок к маслам или для фрикционно-механического модифицирования поверхностей трения деталей при их восстановлении [1–7]. Использование слоистых силикатов, таких как вермикулит и серпентинит в каче-стве триботехнических материалов объясняется тем, что высокодисперсные порошки данных неорганических материалов, имея ярко выраженную слоистую структуру, ока-

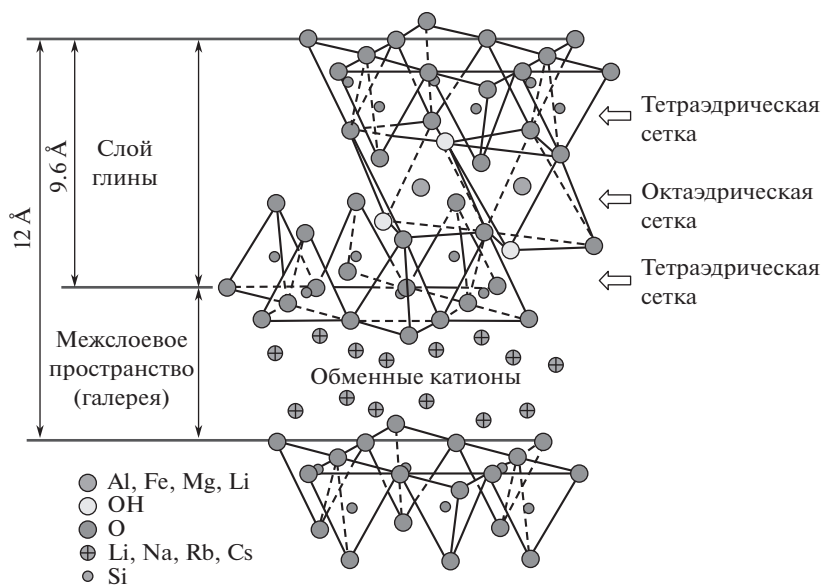


Рис. 1. Структура вермикулита.

зались чрезвычайно перспективными для формирования износостойких металлокерамических тонкопленочных покрытий. Формирование тонкопленочных металлокерамических покрытий на поверхностях трения деталей трибоузлов позволяет решить следующие задачи: повышение ресурса; снижение коэффициента трения и механических потерь (повышение КПД оборудования); ускоренной приработки сопряженных поверхностей [3].

Недостатками серпентинита является значительное различие в химическом составе даже с одного месторождения, а также большим количеством примесей в его составе, которые необходимо убирать для уменьшения абразивных свойств и получения требуемого состава, что приводит к увеличению его себестоимости [2]. Вермикулиты имеют стабильный химический состав и широко применяются в различных отраслях, поэтому их использование более перспективно для решения проблемы повышения износостойкости узлов трения.

Технология получения наноструктурированных композитов на основе природного слоистого силиката вермикулита [5] для формирования металлокерамических покры-

Таблица 1. Химический состав вермикулита и его модифицированных форм

№	Триботехнический материал для формирования покрытия	Содержание элементов и химических соединений, %							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	C	другие
1	Исходный вермикулит	42.72	11.81	24.52	5.75	8.74	0.85	—	0.580
2	Вермикулит + HCl	89.63	5.18	1.06	1.01	0.34	0.17	—	0.017
3	Вермикулит + HCl + + целлюлоза	84.50	4.50	1.00	0.90	0.20	0.10	7.5	—
4	Вермикулит + HCl + полифенилсилоксан	93.00	3.10	1.20	—	0.35	0.08	4.8	—
5	Вермикулит + HCl + + хитозан	95.27	1.26	1.09	—	0.24	—	—	0.017

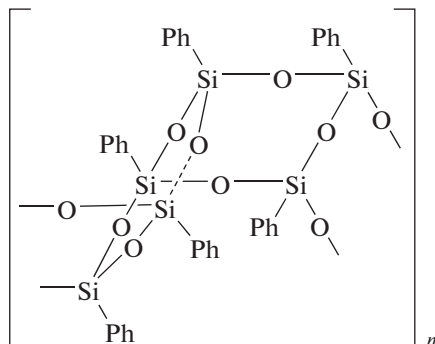


Рис. 2. Структура полифенилсилоксана.

тий на поверхностях трения, обладающих минимальным коэффициентом трения и высокими износо- и задиростойкостью открывает перспективы широкого использования в качестве триботехнических материалов. Однако многие аспекты проблемы зависимости эксплуатационных свойств тонкопленочных покрытий от химического состава и структуры, используемых триботехнических материалов, требуют дополнительных исследований. Поэтому разработка новых трибоматериалов связана с большим объемом экспериментальных исследований для обеспечения стабильности свойств, надежности и эффективности покрытия. Сложность решения данной проблемы определяется зависимостью физико-механических и триботехнических свойств формирующихся покрытий от множества параметров применяемого материала: химического состава, структуры, физико-химических и геометрических параметров и др.

Цель работы — исследование влияния химического состава, структурных и размерных характеристик композитов на основе вермикулита на физико-механические и эксплуатационные свойства формируемых покрытий.

Материалы и методы исследований. Природный вермикулит Ковдорского месторождения имеет общий 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 (рис. 1).

Исходный вермикулит содержит большое количество оксидов кремния, магния и алюминия (табл. 1). Расстояние между слоями находится в пределах 14.3–9.2 Å, в среднем 5.1 Å. В результате обработки вермикулита соляной кислотой происходит увеличение размера “галерей” за счет извлечения ионов алюминия, магния и железа [5].

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 счет растворения оксидов магния, железа и кальция.

Полифенилсилоксан (ПФС) — искусственный слоистый силикат (рис. 2), имеющий стабильный химический состав $[\text{C}_6\text{H}_5\text{SiO}_{1.5}]_n$.

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 $(\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4\text{NH}_2)_n$. Структурная формула представлена на рис. 3.

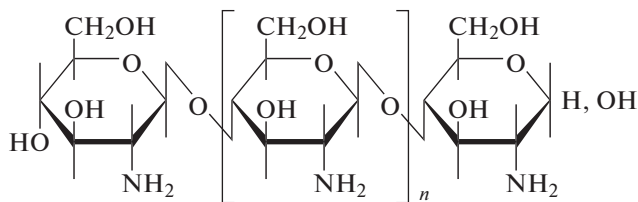


Рис. 3. Структурная формула элементарного звена хитозана.

Плакирование вермикулита, модифицированного кислотой, целлюлозой и ПФС позволяет ввести в состав частиц углерод (табл. 1), который обладает хорошими антифрикционными свойствами.

Рентгенофазный анализ (РФА) проводили на дифрактометре “Advance-D8” фирмы “Bruker”. При съемке РФА-спектров использовали CuK_α -излучение с разрешением 0.02° в диапазоне $2^\circ < 2\theta < 90^\circ$. В исследованиях использовался метод Дебая–Шеррера, который позволяет рассчитать размер частиц, кристаллитов, пакетов [8].

Для определения поверхности твердых тел использовали адсорбционный метод измерения удельной поверхности, отличающиеся высокой точностью и сравнительной простотой. Анализ поверхности образцов методом физической адсорбции азота осуществляли на анализаторе “ASAP 2020 MP” (“Micrometrics GmbH”, США).

Определение удельной поверхности минералов осуществляли по методике ученых Брунауэра, Эммета и Теллера [9]. Размер пор и их объем определяли с помощью ртутного поромера “Autopore-4” фирмы Micrometrics.

Триботехнические испытания проводили на универсальной машине трения модели УМТВК, которая используется для испытаний на трение и износ материалов (производство ООО НПФ “Сигма, г. Тольятти) по схеме “ролик–колодка” в условиях граничного трения при постоянной скорости скольжения 0.63 м/с, в связи с тем, что критерием, отличающим капитальный ремонт судового двигателя от среднего, является техническое состояние коленчатого вала. Когда по результатам дефектации состояние коленчатого вала классифицируется как работоспособное, капитальный ремонт двигателя может быть заменен объемом среднего ремонта, а срок эксплуатации двигателя до капитального ремонта продлевается. Если состояние коленчатого вала классифицируется как неработоспособное, то такой двигатель требует капитального ремонта. Поэтому триботехнические испытания проводили для сопряжения “шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника”. В качестве неподвижного образца использовались колодки, вырезанные из современного вкладыша типа “Rillenlager” (“Miba” 33). Диски для упрочнения были взяты из стали 40Х твердостью 230 НВ, т.к. 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-ДЦЛ-30 ГОСТ 12337-84.

Нагрузку при формировании покрытия и трибоиспытаниях изменяли в соответствии с режимами (табл. 2).

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). Прибор предназначен для измерения твердости, модуля упругости и упругого восстановления по методу наноиндентирования.

Таблица 2. Режимы формирования покрытия и триботехнических испытаний

Нагрузка, Н	40	100	200	400
Время нанесения покрытия, мин	—	1	1	1
Время формирования покрытия, мин	—	5	10	45
Время трибоиспытаний, мин	30	30	60	60

Таблица 3. Физико-химические характеристики исследуемых триботехнических материалов

Триботехнический материал для формирования покрытия	Удельная поверхность частицы, м ² /г	Общий объем пор, см ³ /г	Средний размер пор, нм	Средний размер частиц, нм	Максимальная сорбция красителя*, мг/г
Вермикулит	12.88	0.028	18.0	682.0	37.0
Вермикулит + HCl	340.37	0.375	6.8	25.8	75.0
Вермикулит + HCl + + целлюлоза	286.00	0.130	2.5–4.0	102.1	—
Вермикулит + HCl + + 9% ПФС	387.00	0.030	5.0–6.0	135.0	33.6
Вермикулит + HCl + + хитозан	333.58	0.280	4.8	26.5	184.0

Примечание. * — В качестве красителя применяли бриллиантовый зеленый.

ния. Испытания соответствуют стандарту ISO 14577-4. 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. Частицы исходного вермикулита (табл. 3) имеют маленькие величины удельной поверхности и объема пор, но большой средний размер частиц 682 нм. Модифицирование вермикулита соляной кислотой позволяет не только существенно изменить его химический состав, но и уменьшить размер частиц на порядок: с 682 нм до 26 нм (табл. 3). При этом общий объем пор и удельная поверхность частиц возрастают более чем на порядок, а также повышается их сорбционная способность и следовательно, маслосъемность. Кристаллическая структура вермикулита разрушается и становится аморфной (рис. 4б). На дифрактограмме имеются отражения в области 2° и 22°, т.е. полученная структура похожа на структуру, характерную для аморфных силиконов. Такая картина, с небольшим отличием, наблюдается и для вермикулита, модифицированного затем ПФС (рис. 4в) или хитозаном. Первое отражение, отвечающее межплоскостному расстоянию, несколько сдвигается в область малых углов, т.е. больших расстояний. При этом второе отражение, отвечающее расстоянию внутри силиконовой цепи, не изменяется.

Полифенилсилоксан и целлюлоза хорошо плакируют частицы вермикулита и склеивают их между собой, поэтому размер частиц возрастает в несколько раз (табл. 3), при этом создается минеральная силикатная основа, на которой формируется полимерное силикатное покрытие. При этом удельная поверхность частиц изменяется незначительно, а общий объем пор уменьшается. Композиты, содержащие ПФС, обладают высокой адгезией к металлам.

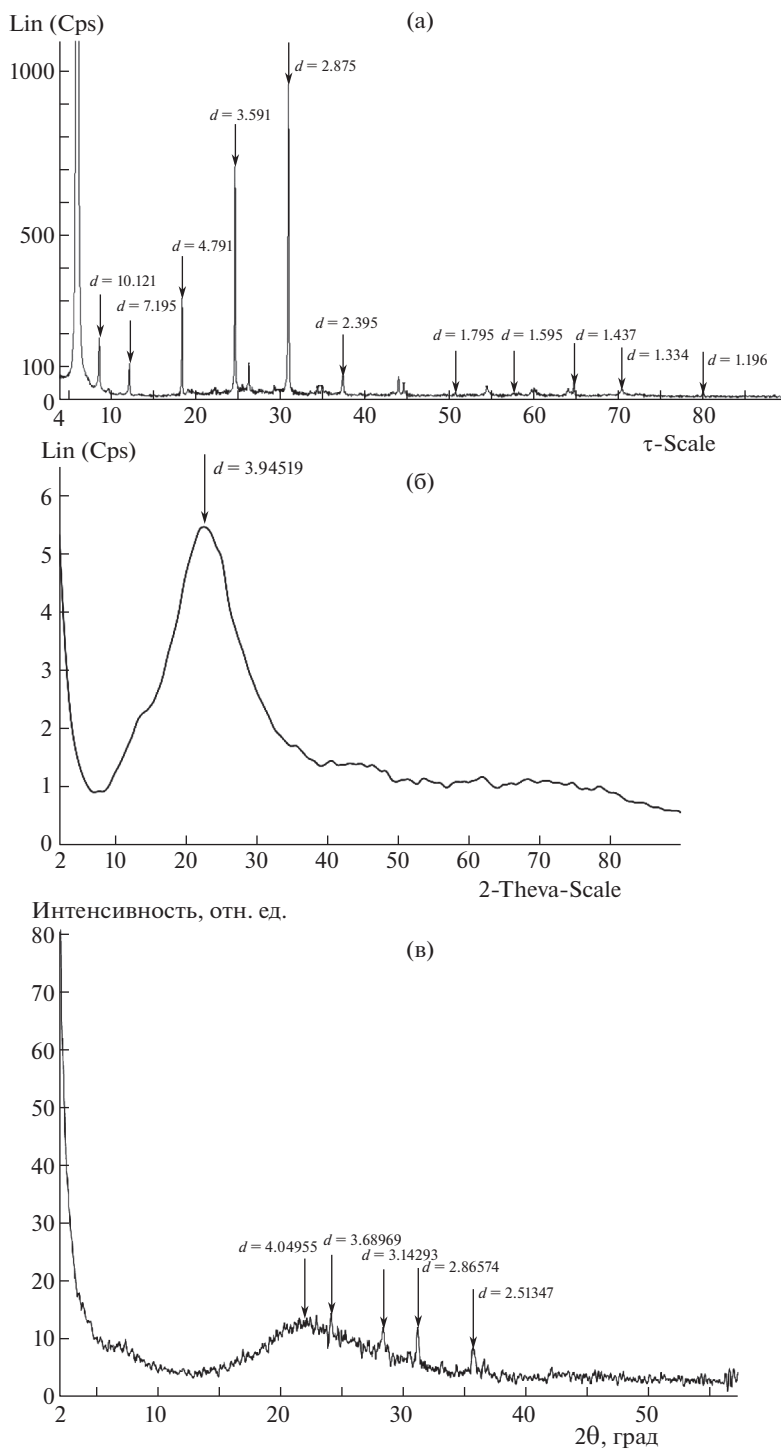


Рис. 4. Дифрактограммы: (а) — исходного вермикулита; (б) — вермикулита, обработанного кислотой; (в) — вермикулит + HCl + ПФС.

Увеличение размера “галереи” за счет расширяющейся решетки вермикулита после его обработки кислотой позволяет вводить полимерную молекулу ПФС, толщина которой равна 4,6–4,8 Å, согласно данным рентгенофазового анализа (РФА) и позитронно-аннигиляционной спектроскопии [5], а структуры их во многом близки по природе. Это также подтверждается данными РФА-спектроскопии (рис. 3в). При введении в “галерею” ПФС происходит эксфолиация вермикулита, что подтверждается данными РФА-спектроскопии. При модификации вермикулита в растворе происходит образование покрытия молекулярного характера в связи с близостью физико-химических характеристик ПФС и силиката.

Увеличение размера “галереи” за счет расширяющейся решетки вермикулита после его обработки кислотой позволяет вводить полимерную молекулу ПФС, толщина которой равна 4,6–4,8 Å, согласно данным рентгенофазового анализа (РФА) и позитронно-аннигиляционной спектроскопии [5], а структуры их во многом близки по природе. Это также подтверждается данными РФА-спектроскопии (рис. 3в). При введении в “галерею” ПФС происходит эксфолиация вермикулита, что подтверждается данными РФА-спектроскопии. При модификации вермикулита в растворе происходит образование покрытия молекулярного характера в связи с близостью физико-химических характеристик ПФС и силиката.

Обработка вермикулита, модифицированного кислотой, хитозаном меняет характер поверхности, но практически не изменяет размер частицы, общий объем пор снижается в 1,3 раза, однако максимальная сорбция возрастает в 2,4 раза.

Формирование покрытия выполняли за две технологические операции.

Первая операция. Модифицирование поверхностей трения осуществляли фрикционным методом в течение 3 мин стальным индентором (ролик диаметром 45 мм, твердость после закалки 54–56 HRC). Модифицирующий состав, состоящий из модифицирующего материала и масла, предварительно наносится на упрочняемую поверхность и подается в зону трения каждые 15–20 с капельным методом (табл. 2). На данном этапе превалируют процессы абразивного изнашивания поверхности стали и насыщения ее поверхностного слоя элементами триботехнического материала, начинается процесс формирования тонкопленочного покрытия [5].

Вторая операция. Формирование износостойкого металлокерамического покрытия производится стальным индентором (ролик диаметром 45 мм, твердость после закалки 54–56 HRC) в течение 1 часа (смазка подается в зону трения без модификатора для уменьшения скорости абразивного изнашивания) (табл. 2). На данном этапе происходит окончательное формирование металлокерамического покрытия на поверхности трения, которое характеризуется минимальным содержанием железа и большим содержанием углерода, кислорода и кремния [5].

Модифицирование стали вермикулитом, композицией и композитами на основе модифицированного кислотой и полимерами вермикулита позволяет получать тонкопленочное покрытие толщиной 7,0–8,3 мкм, (в среднем 7,8 мкм) с физико-механическими свойствами в широком диапазоне (табл. 4), которые оказывают существенное влияние на эксплуатационные показатели: долговечность, которая определяется в первую очередь скоростями изнашивания сопряженных поверхностей в условиях трения при граничной смазке, эффективность (потери на трение и температура поверхностей зависят от коэффициента трения).

Большой разброс значений модуля упругости и твердости объясняется химической и структурной неоднородностью покрытия: в мягкую матрицу (сталь) внедрены оксиды алюминия и кремния, которые соответственно имеют различные параметры. Например, при упрочнении композитом вермикулит + ПФС после трибоиспытаний поверхностный слой имеет следующий состав (в атомных процентах): O = 43,2; C = 39,8;

Таблица 4. Физико-механические свойства поверхностного слоя исходной стали 40Х и после ее модифицирования различными материалами

Материал для модифицирования	Вид обработки или испытаний	Модуль упругости покрытия $E \times 10^5$, МПа	Динамическая нанотвердость, НВ	Величина упругого восстановления покрытия W_e
Сталь исходная (немодифицированная)	шлифование	$\frac{1.8-25.2}{10.3}$	$\frac{268-482}{356}$	0.68
	триботехнические испытания	$\frac{8.4-12.8}{9.6}$	$\frac{500-642}{588}$	0.76
Однокомпонентные материалы				
Вермикулит	триботехнические испытания	$\frac{1.3-2.7}{1.8}$	$\frac{386-1120}{694}$	0.86
Вермикулит + НСІ	формирование покрытия	$\frac{0.5-2.2}{1.07}$	$\frac{368-916}{484}$	0.70
	триботехнические испытания	$\frac{1.6-24.6}{12.9}$	$\frac{320-680}{582}$	0.64
Композиты				
Вермикулит + ПФС	триботехнические испытания	$\frac{1.4-3.5}{1.9}$	$\frac{387-1098}{587}$	0.95
Вермикулит + НСІ + хитозан	формирование покрытия	$\frac{13.1-31.4}{20.1}$	$\frac{363-467}{425}$	1.15
	триботехнические испытания	$\frac{0.3-19.8}{3.8}$	$\frac{286-580}{450}$	0.64
Вермикулит + НСІ + ПФС	формирование покрытия	$\frac{0.74-4.2}{2.0}$	$\frac{591-985}{792}$	2.04
	триботехнические испытания	$\frac{2.52-17.2}{10.4}$	$\frac{408-640}{544}$	2.2
Композиция				
Вермикулит + НСІ + производная молибдена	формирование покрытия	$\frac{0.7-4.2}{1.7}$	$\frac{392-771}{481}$	2.08
	триботехнические испытания	$\frac{0.2-17.0}{8.60}$	$\frac{382-557}{468}$	0.90

Примечание. В числителе приведен интервал изменения величины, в знаменателе – средняя величина параметра.

Al = 7.2; Fe = 4.5; Si = 2.4; N = 1.6; Ca = 1.0; Sn = 0.3; Pb = 0.1; после травления поверхности аргоном на глубине 100 нм: O = 45.5; Fe = 21.1; Al = 18.6; C = 10.6; Si = 2.9; Ca = 1.1; N = 0.5; Sn = 0.3; Pb = 0.1.

Покрывтие, полученное в результате трибомодифицирования стали вермикулитом, характеризуется высокой средней твердостью по сравнению со сталью после шлифования, значительным разбросом величин твердости и низким значением модуля упругости (примерно на порядок меньше стали после трибоиспытаний), возрастает также величина упругого восстановления. Большие значения нанотвердости имеют включе-

ния оксида алюминия, а матрица имеет величину твердости примерно такую же, как у исходной стали.

Покрытие, полученное при использовании частиц вермикулита, плакированного ПФС, имеет практически такие же величины модуля упругости и упругого восстановления, однако средняя твердость его на 18% меньше (табл. 4) чем при применении вермикулита. Использование вермикулита, обработанного соляной кислотой, приводит к значительному уменьшению средней величины и диапазона изменения величин твердости покрытия вследствие уменьшения количества оксида алюминия, а также снижению величин модуля упругости и упругого восстановления покрытия вследствие изменения химического состава и структуры исходного материала. Модифицирование вермикулита, обработанного кислотой, а затем хитозаном позволяет получить покрытие, которое имеет большие величины модуля упругости и упругого восстановления, но низкие значения величины твердости (табл. 4). Модифицирование вермикулита, обработанного кислотой, а затем ПФС позволяет получить покрытие с максимальной твердостью и величиной упругого восстановления при низком модуле упругости. Композиция вермикулита, обработанного кислотой, и производной молибдена позволяет получить покрытие с достаточно высокой твердостью и величиной упругого восстановления при низком модуле упругости.

Следует отметить, что средняя величина поверхностной нанотвердости исходной стали в процессе триботехнических испытаний возрастает, а значение модуля упругости остается примерно таким же. Величина упругого восстановления покрытия у всех материалов за исключением ПФС в процессе триботехнических испытаний снижается до уровня стали вследствие частичного изнашивания покрытия.

Таким образом, 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.

Анализ скоростей изнашивания на этапах нанесения триботехнического материала и формирования (табл. 5) показал, что наиболее высокими абразивными свойствами обладает вермикулит вследствие высокого содержания оксида алюминия и большого размера частиц (на образцах формируются следы царапин). Плакирование частиц вермикулита ПФС приводит к незначительному повышению скорости изнашивания при нанесении материала, однако при формировании покрытия скорость снижается в три раза по сравнению с немодифицированным вермикулитом.

Модифицирование вермикулита соляной кислотой позволяет снизить скорость изнашивания на данных этапах примерно в два раза вследствие изменения структуры триботехнического материала, уменьшения содержания оксида алюминия и размера частиц. Использование композиций и композитов на основе вермикулита, модифицированного кислотой, для формирования покрытий обеспечивает снижение скорости изнашивания стали по сравнению с модифицированным вермикулитом, особенно на этапе нанесения материала. Минимальные скорости изнашивания при формировании покрытия получают при использовании композита вермикулит + HCl + ПФС и композиции вермикулит + HCl + производная молибдена. Таким образом, 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%), размер частиц должен быть не более 100 нм, а структура предпочтительна полиморфная. Плакирование частиц вермикулита ПФС позволяет повысить износостойкость стали в процессе триботехнических испытаний в 1.5 раза, при этом скорость изнашивания вкладыша уменьшается незначительно, однако коэффициент трения возрастает в два раза.

Таблица 5. Скорости изнашивания стали 40X на различных этапах формирования покрытия, деталей сопряжения в процессе трибоиспытаний и различных материалах для формирования покрытия

№ п/п	Триботехнический материал для формирования покрытия	Скорость изнашивания стали, мг/ч			Скорость изнашивания вкладыша в процессе трибоиспытаний, мг/ч	Коэффициент трения при максимальной нагрузке
		при нанесении материала	при формировании покрытия	в процессе трибоиспытаний		
1	Сталь без упрочнения	—	—	2.7	10.5	0.079
Однокомпонентные материалы						
2	Вермикулит	64	3.4	0.6	3.5	0.036
3	Вермикулит + HCl	28	1.7	0.1	2.5	0.046
Композиты						
4	Вермикулит + 9% ПФС	72	1.1	0.4	3.2	0.036
5	Вермикулит + HCl + хитозан	18	1.5	0.5	5.1	0.036
6	Вермикулит + HCl + 9% ПФС	8	1.4	0.1	1.9	0.014
7	Вермикулит + HCl + целлюлоза	2	0.1	1.0	1.9	0.014
Композиция						
8	Вермикулит + HCl + производная молибдена	2	0.1	0.6	1.5	0.022

Модифицирование вермикулита кислотой позволяет существенно снизить скорость изнашивания стали не только на этапах формирования покрытия, но и в процессе триботехнических испытаний (табл. 5) вследствие уменьшения содержания оксида алюминия в покрытии, изменения структуры с кристаллической на полиморфную, повышения модуля упругости, хотя при этом происходит снижение величины его твердости. Скорость изнашивания вкладыша при работе в паре с покрытием, сформированным модифицированным вермикулитом, значительно уменьшается в условиях трения при граничной смазке, однако коэффициент трения несколько возрастает.

Модифицирование вермикулита кислотой позволяет существенно снизить скорость изнашивания стали не только на этапах формирования покрытия, но и в процессе триботехнических испытаний (табл. 5) вследствие уменьшения содержания оксида алюминия в покрытии и повышения модуля упругости, хотя при этом происходит снижение величины его твердости покрытия. Скорость изнашивания вкладыша при работе в паре с покрытием, сформированным модифицированным вермикулитом, значительно уменьшается в условиях трения при граничной смазке, однако коэффициент трения несколько возрастает.

Максимальную износостойкость трибосопряжения обеспечивают следующие материалы: композит вермикулит + HCl + 9% ПФС и композиция вермикулит + HCl + производная молибдена. При этом покрытие, сформированное композитом вермикулит + HCl + 9% ПФС, обладает наибольшей твердостью среди исследованных материалов, а композицией вермикулит + HCl + производная молибдена в 1.6 раза меньше. Следует отметить, что применение этих двух материалов позволяет получить покрытие с наибольшими величинами упругого восстановления, которые обеспечивают

максимальную площадь соприкосновения сопряженных поверхностей и, соответственно, минимальную удельную нагрузку.

Таким образом, максимальную износостойкость трибосопряжения “шейка вала—вкладыш подшипника” в процессе эксплуатации обеспечивают покрытия, имеющие максимальные величины твердости и упругого восстановления покрытия и минимальную величину — модуль упругости.

Минимальный коэффициент трения ($k_{тр} = 0.014$) в условиях трения при граничной смазке в трибосопряжении (табл. 5) обеспечивается при применении композитов на основе вермикулита, содержащих углерод (табл. 2). Композиция модифицированного вермикулита с производной молибдена позволяет получить также достаточно низкий коэффициент трения ($k_{тр} = 0.022$).

Выводы. Получение оптимальных эксплуатационных свойств для обеспечения долговечности и эффективности трибосопряжения (на примере узла “коленчатый вал—вкладыш подшипника” судового среднеоборотного дизеля) можно достичь путем применения композиций и композитов на основе модифицированного вермикулита для формирования тонкопленочных износостойких покрытий на стальных поверхностях.

На этапах формирования покрытия на скорость изнашивания стали наибольшее влияние оказывают химический состав (в частности величина содержания оксида алюминия), структура (кристаллическая или полиморфная) и размер частиц триботехнического материала на основе вермикулита. Следует ограничивать содержание оксида алюминия (оптимальное количество 4.5–5.2%), размер частиц должен быть не более 100 нм.

Минимальный износ поверхностей трибосопряжения “шейка вала—вкладыш подшипника” в процессе эксплуатации обеспечивают тонкопленочные покрытия на стали на основе модифицированного вермикулита, имеющие максимальные величины твердости и упругого восстановления покрытия и минимальную величину — модуль упругости. Данные свойства покрытий позволяют получить следующие материалы: композит вермикулит, модифицированный соляной кислотой и 9% полифенилсилоксана, и композиция вермикулит, модифицированный соляной кислотой, и производная молибдена.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Погодаев Л.И.* Влияние геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 1. С. 58.
2. *Погодаев Л.И., Кузьмин А.А.* Структурно-энергетические модели надежности материалов и технических средств. СПб.: СПГУВК, 2010. 123 с.
3. *Дунаев А.В., Ладиков В.В., Пустовой И.Ф., Голубев И.Г.* Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК: науч. издание. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2014. 164 с.
4. *Колокатов А.М.* Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 215 с.
5. *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.

-
6. Шапкин Н.П., Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Шкуратов А.Л., Васильева В.В. Исследование влияния состава минеральных и органоминеральных смесей на триботехнические характеристики пар трения // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. № 8. С. 961.
 7. Jaber M., Miehé-Brenble J., Roux M., Dentzer J. and other. A new Al, Mg-organoclay // New Journal Chemistry. 2002. № 26. P. 1597.
 8. Shantarovich V.P. Positronium Atom in Solids—Peculiarities of Formation and Interconnection with Free Volume Nanostructure // Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences. 2006. V. 7. N. 1. P. 37.
 9. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers // Journal of the American Chemical Society. 1938. V. 60. P. 309.
 10. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.