

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.891:656.53

СЕРПЕНТИНЫ – КАК ДОБАВКИ К МАСЛАМ:
ЭФФЕКТИВНОСТЬ И МЕХАНИЗМ СМАЗОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ© 2021 г. А. Ю. Албагачиев¹, И. А. Буяновский^{1,*}, А. В. Дунаев²,
А. А. Гвоздев³, В. Д. Самусенко¹¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия³ Ивановская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.К. Беляева, Иваново, Россия

*e-mail: buyan37@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 24.06.2021 г.

Рассмотрены материалы об эффективности применения серпентинов в качестве противоизносных, антифрикционных, антикоррозионных, экологически безопасных ресурсовосстанавливающих добавок к смазочным материалам. Обсуждаются методы активации серпентинов для усиления их функционирования. Анализируются современные представления о механизме триботехнического действия серпентинов. На их базе предложено описание последовательности процессов, обеспечивающей эффективное трибологическое действие смазочных сред с минералами группы серпентина.

Ключевые слова: серпентин, геомодификатор трения, термическая активация, компенсация износа, сверхскользкость

DOI: 10.31857/S0235711921050035

По данным ООН до 30% вырабатываемой в мире энергии затрачивается на преодоление трения в механизмах. Это обуславливает значительный расход топлива и не возобновляемых энергетических ресурсов. Традиционным методом сокращения этих затрат является создание энерго- и ресурсосберегающих смазочных материалов, которые обеспечивают уменьшение потерь на трение и износ деталей за счет введения в их состав присадок различного назначения. Так дизельные масла включают 6–25%, трансмиссионные – 8–12% присадок, причем до 5–7% присадок повышают смазочную способность масел.

В режиме граничной смазки присадки обеспечивают улучшение противоизносных и антифрикционных свойств масел [1]. Значительная их часть представляет собой дорогие продукты. Зачастую они включают соединения серы, хлора, фосфора и их сочетания, отрицательно влияющие на окружающую среду при их производстве, хранении, применении, утилизации, вызывающие коррозию цветных металлов [2].

Одним из апробированных путей улучшения свойств масел и пластичных смазок является ввод в них противоизносных и антифрикционных добавок из высокодисперсных порошков минералов группы серпентина, слоистых гидросиликатов в основном магния, описываемых формулой $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ [3, 4], где магний частично замещается алюминием, никелем, железом. Композиции порошков этих минералов, названных геомодификаторами трения (ГМТ), обеспечивают не только существенное

повышение противоизносных и антифрикционных свойств смазочных композиций, превосходя традиционные присадки при существенно меньших концентрациях (0.05–0.40 мас. %), но и обеспечивают ремонтно-восстановительный эффект, являющийся их визитной карточкой [5, 6, 10, 13, 16], значительно улучшают экологичность смазочных материалов [5, 6], предотвращают коррозию цветных металлов [7], не изменяя действие присадок [4].

Так при введении в смазочное масло серпентинсодержащей добавки Форсан коэффициент трения уменьшается в 2.5 раза [8]. Противоизносные и антифрикционные свойства пластичной смазки “Политерм” повышаются одинаково, как при введении в нее дисульфида молибдена, так и композиции АРВК на основе серпентинита [9]. Но основным преимуществом смазочных композиций на основе ГМТ является их способность постепенно наращивать на поверхностях трения противоизносное ремонтно-восстановительное покрытие, продлевающее ресурс работы узлов трения в 1.5–3 раза [5, 10]. Именно эта способность ГМТ объясняет повышенное внимание к ним исследователей и производителей ГМТ [10–13]. Например, пробег отечественных легковых автомобилей до капитального ремонта ДВС, приработанных с ГМТ, достигал 550–870 тыс. км, при пробеге с обычными маслами лишь 80–120 тыс. км [10].

Но, несмотря на многочисленные исследования, влияние ГМТ на смазочную способность масел, механо-физико-химический механизм их триботехнического действия в полной мере еще не раскрыт, что затрудняет оптимизацию как материального состава ГМТ, так и технологий их применения для различных узлов трения [13]. Основные гипотезы механизма смазочного действия ГМТ приведены в работе [14], но новые исследования позволяют анализировать их действия более углубленно, как минимум, на уровне феноменологии трибологического процесса в серпентинсодержащих средах.

Целью настоящей статьи является представление результатов этого анализа, проведенного на базе последних исследований ГМТ и моделей процесса трения в смазываемых узлах трения машин и оборудования.

Особенности серпентиновых геомодификаторов трения. Серпентины. Обычно ГМТ на 70–80% состоят из высокодисперсных порошков минералов группы серпентина, включающих до 28 разновидностей, которые обеспечивают противоизносный, антифрикционный и ремонтно-восстановительный эффекты в узлах трения. По структуре и трибологическому поведению эти серпентины (ГМТ второго поколения) отличаются от твердых смазочных материалов, включая ГМТ первого поколения – графит, молибденит (MoS_2) [10, 13]. Измельченные графит или молибденит наносят на поверхности деталей тем или иным методом, или вводят в смазочный материал, так что эти твердые смазки, попадая в трибологический контакт, удерживаются на поверхностях трения только силами адгезии. ГМТ в смазочном материале в процессе трения сами создают автогенерируемые покрытия, компенсирующие износ поверхностей трения, обеспечивая порой столь низкое трение, что их действие относят к реализации *эффекта сверхскользкости* (superlubricity) [15].

Структурной единицей серпентинов (триоктаэдрических слоистых гидросиликатов) является сложная пластинчатая композиция толщиной 0.72 нм, в которой триоктаэдрическая бруситоподобная “сетка” $\text{Mg}[\text{Mg}_2\text{O}_2(\text{OH})_4]^{6-}$ соединена с тетраэдрической силикатной “сеткой” $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$ через общие вершины (рис. 1, [4]).

В структуре главной разновидности серпентинов чередуются магниевые $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ с кремниевыми (Si_2O_5) слоями (рис. 1). Вследствие этого параллельные слои структуры слабо связаны между собой по вертикали, что обеспечивает незначительное сопротивление их сдвигу при трении сопряжений с ГМТ как в масле, так и без него [16].

Между бруситоподобной и силикатной “сетками” существует заметное размерное несоответствие. Так размер ячейки, занятой катионом Mg^{2+} , составляет 9.43 Å, а ячей-

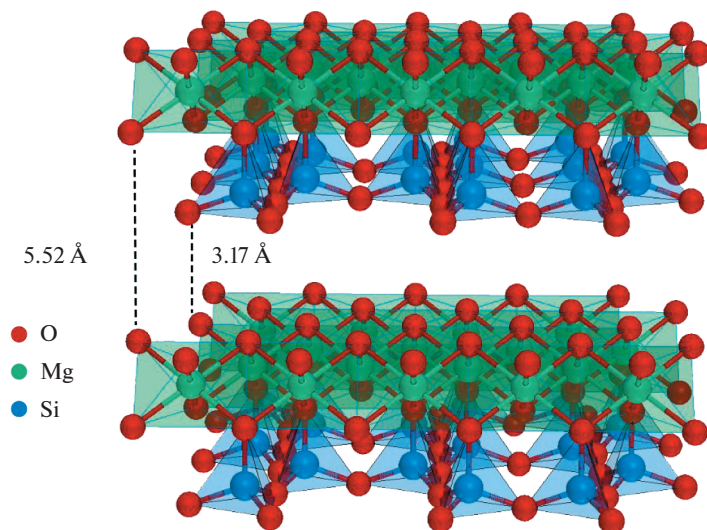


Рис. 1. Базовая структура серпентина (по данным [4]).

ки, занятой катионом Si^{4+} в кремниевой тетраэдрической “сетке”, существенно меньше – 9.1 \AA . Это несоответствие вызывает заметные напряжения, приводящие к деформациям этих слоев, образуя даже изогнутые слои в полиморфных разновидностях серпентина с одинаковым химсоставом, но с разной кривизной слоев: волокнистый хризотил, пластинчатый агломерированный антигорит и удлиненные минеральные частицы лизардита [4]. В лизардитах напряженность компенсируется не только за счет искажения геометрии “сеток”, но и за счет частичного замещения Si и Mg на Al и Fe.

Состав серпентина в переводе на оксиды и воду составляет (по массе): 43% MgO, 44% SiO_2 и 12.1–12.9% H_2O . Конституционная вода выделяется при повышении температуры в зоне трения к $150\text{--}300^\circ\text{C}$, разрушая кристаллическую структуру. По другим данным хрупкая бруситоподобная “сетка” легко разрушается и при механическом воздействии, выделяя конституционную воду и ионы магния, затем принимающие участие в ионно-обменных реакциях [13]. Твердость серпентина 2.5–3.5 по шкале Мооса [16]. В группе минералов серпентина включены 28 разновидностей, но в их составе и сопутствующие минералы на основе Al, Ni, Fe, Ca и др., а также существенно более твердые вещества: магнитный и хромистый железняк, сульфиды меди, никеля и железа, реликты оливинов – например, $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$, имеющий твердость 6.5 по шкале Мооса, а менее качественные ГМТ-составы включают также микропримеси талька, кварца и других минералов [16, 17]. Отсюда свободные от примесей ГМТ не существуют.

Значительное влияние на вариацию трибологических свойств ГМТ оказывает вариация в них разновидностей серпентина: хризотила, антигорита и лизардита, т.к. они действуют по-разному, а состав ГМТ, приготовленного даже из одного куска руды серпентинита, не постоянен. То же относится и к содержанию примесей, так как состав ГМТ зависит от месторождения руды и может изменяться даже в малых ее объемах [18]. А изменение содержания даже одной из примесей может заметно сказаться на трибологических характеристиках ГМТ, что в работе [18] показано на примере вторичного магнетита Fe_3O_4 (твердость 5.6 по Моосу). Его зерна в $1\text{--}10 \text{ мкм}$ из железа,

не вошедшего в серпентин при серпентинизации железно-магниевого силиката, могут распределяться в кристаллах или агрегатах серпентинитов.

В работе [19] исследованы трибологические характеристики минерального масла с ГМТ с различным содержанием магнетита (4 мас. % и менее). При уменьшении его содержания коэффициент трения снижался с 0.16 при 4 мас. % до 0.11 при ГМТ без магнетита. Однако, минимальный коэффициент трения – 0.10 был получен при содержании магнетита 2 мас. %. При этом поверхности трения эффективно выглаживались, было достаточно магнетита для образования “скелета” к затравке в образовании покрытия, представляющего трибополимер с высокой прочностью и с нарастающей толщиной для компенсации износа сопряжений.

Другие ингредиенты ГМТ также, но по-своему, оказывают заметное влияние на трибологию сопряжений, а управлять ей сложно, так как соотношение ингредиентов в ГМТ случайно. Это затрудняет интерпретацию результатов трибологических испытаний серпентинитов разных месторождения и из разных руд одного месторождения. Для углубленного понимания механизма работы ГМТ возможно исследование его с синтезированным серпентином $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$. Авторы [20] синтезировали из него покрытие и получили эффекты, характерные для природных серпентинитов: значительное снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания при оптимальной концентрации добавки, а также автогенерацию ремонтно-восстановительных покрытий.

Приготовление ГМТ начинается с дробления кусков серпентинита и размола его частиц на мельницах для получения порошка высокой дисперсности. Согласно [16] оптимальный размер фракций порошка ГМТ должен быть 5–10 мкм. Более мелкие частицы коагулируются, образуют конгломераты 100–120 мкм и маслофильтрами отфильтровываются. По Д.М. Телух [17] частицы ГМТ с начальными размерами 5–10 мкм измельчаются в смазываемом узле трения до 2 мкм, что, по его данным, соответствует оптимальной шероховатости и наибольшей износостойкости сопряжений. По данным [13] при исходных размерах частиц серпентинита 5–6 мкм их измельчение в сопряжениях в 2.5–3 раза приводит к повышению износостойкости сопряжений также в 2.5–3 раза. Но в [21] считается, что и нанодобавки ГМТ также оказывают достаточно эффективное действие.

Композиции на основе серпентинитов. Композиции на основе серпентинитов используют в различных смазочных материалах: в моторных и трансмиссионных маслах, в пластичных смазках независимо от наличия любых присадок. Серпентинитсодержащие добавки вводят в смазочные материалы в малых концентрациях. Так в [10, 16] показано, что оптимальное содержание серпентинита в моторных маслах составляет 0.05–0.40% (по массе), а в пластичных смазках – до 4.0%.

Наиболее известны такие композиции серпентинитов в ГМТ как АРВК, СУПРОТЕК, Трибо, Форсан, ХАДО; других отечественных и зарубежных существовало на порядок больше [10]. Одни из них представляют собой суспензии высокодисперсного порошка серпентинитов, другие (АРВК, ХАДО и др.) – это сочетания основного ресурсовосстанавливающего антифрикционного компонента с усиливающими его ингредиентами. Так трибосостав АРВК – это синергетическое сочетание высокодисперсного серпентинита и трибополимеробразующей присадки ЭФ-357 [9]. В основном, состав этих дополнительных авторских ингредиентов не известен. Например, в [15] упоминают, что вместе с гидроксидом силиката магния в зону трения вводили “специальные катализаторы”.

Анализ трибологического поведения смазочных материалов с ГМТ. При исследовании трибологического поведения ГМТ следует иметь в виду, что реализация ими противозносного, антифрикционного и ресурсовосстанавливающего эффекта – процесс многостадийный и длительный. Поэтому кратковременные лабораторные испытания ГМТ в ряде случаев оказываются малоинформативными. Некоторую информацию

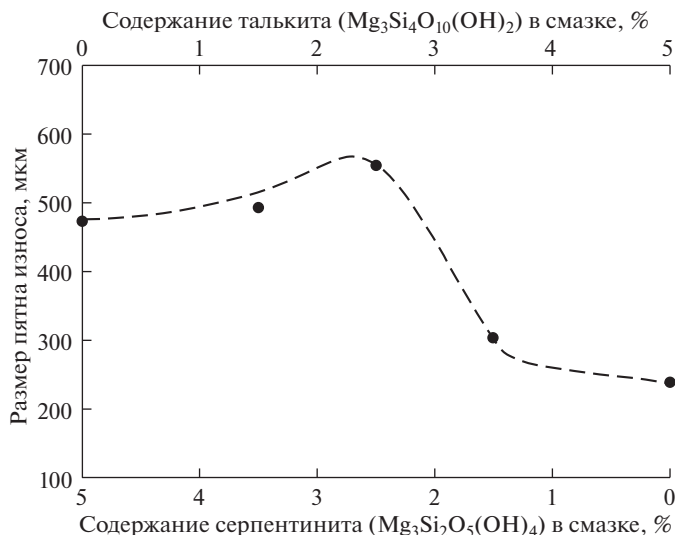


Рис. 2. Зависимость диаметра пятна износа от содержания “талькита” в смеси “талькит+серпентинит”, как добавки к смазке Литол-24 [24].

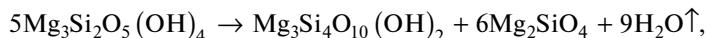
удается получить при исследовании поверхностей трения, длительно работавших в серпентинсодержащих средах [22]. Рассмотрим основные этапы образования трибопокрытия на стальных образцах из суспензий высокодисперсных порошков серпентинов.

1. **Начальным этапом** подготовки поверхностей трения к организации трибопокрытия является активация поверхностей трения [23]. Твердые составляющие ГМТ абразивно изнашивают тончайшие поверхностные слои деталей, могут шаржировать поверхность более мягкой детали, что приводит к повышению температуры в контактах к 150–300°С. Окончательное “суперфинишное” выглаживание поверхностей трения и их очистка осуществляется мягким абразивом из чешуек разрушившихся частиц ГМТ.

2. **Повышение при трении контактной температуры** вызывает разложение частиц серпентина с образованием более активных в трении веществ. Известны четыре типа реакций разложения серпентинов с выделением силиката магния, кварца, окиси магния, воды, кислорода. Основная реакция



В работе [24] рассмотрена разветвленная реакция



где $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ – антигорит; $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – “талькит”; Mg_2SiO_4 – форстерит; H_2O – вода.

Продукты всех реакций активируют, но по-разному обеспечивают образование ремонтно-восстановительного покрытия поверхностей трения.

Для испытания на ЧШМ по ГОСТ 9490-75 различных гидросиликатов как добавок к пластичной смазке Литол-24 был составлен ряд композиций серпентинов и “талькита”, причем суммарное их содержание составляло 5 мас. % смазывающей среды. Результаты испытаний различных пропорций этих смесей представлены на рис. 2 [25].

Как видно на левой части графика, диаметр пятна износа с увеличением доли “талькита” возрастает, доходит до максимума при 2.5% его содержания, а при даль-

Таблица 1. Амплитуды вертикальных виброперемещений подшипниковых опор четырехопорного дутьевого вентилятора ДВ26 (по данным [9])

Даты контроля	Виброперемещения, мкм, по подшипниковым опорам			
	1	2	3	4
26.07.2001	114	64	54	26
29.08.2001	57	47	51	28
23.05.2002	57	47	51	28
15.10.2003	40	27	18	17

нейшем повышении его содержания резко снижается и при добавке, целиком состоящей из “талькита”, диаметр пятна износа почти вдвое меньше, чем при добавке, целиком состоящей из серпентина. Иначе говоря, “талькит” обеспечивает трибосопряжение более высокие триботехнические свойства, чем серпентин.

3. **Повышенное выделение воды** с отработавшими газами при приработке ДВС с ГМТ свидетельствует о том, что начальные физико-химические процессы, обеспечивающие адаптацию элементов триады “сталь–серпентин–сталь” завершены и далее могут рассматриваться как “сталь–покрытие–сталь”. Но для реализации такой адаптации необходимо, чтобы была предварительно обеспечена термическая и нагрузочная [3, 11, 17] активация трибопроцессов.

В [25] на ЧШМ с моторным маслом API CF/SL SAE 5W-30 и с добавкой 0.01% (объемн.) и более, измельченной до 9 мкм и принятой как аналог серпентина, показано, что со свежими шарами наблюдалось некоторое повышение коэффициента трения по сравнению с испытаниями без добавки. При испытании той же смазочной композиции с предварительно изношенными в других испытаниях шарами было значительное – на 47% снижение коэффициента трения [25]. Анализ зависимости коэффициента трения от длительности испытаний показал, что при трении свежих шаров наблюдался постепенный переход от смешанного режима смазки в граничный, а с изношенными шарами – наоборот переход от граничного режима к смешанной смазке.

После испытаний смеси силиката магния с глиноземом на поверхностях ранее изношенных шаров обнаружены железо, кремний и кислород, что, по данным [25], свидетельствовало об образовании ферросиликатного слоя. Аналогичное образование в серпентинсодержащей среде покрытий только на ранее изношенных поверхностях имеет место и с пластичной смазкой.

Авторы работы [9] подтвердили образование в серпентинсодержащей среде покрытий, компенсирующих износ сопряжений. Испытания проводили для четырехопорного вала дутьевого вентилятора ДВ26 Московской ТЭЦ 25 (табл. 1). Здесь вентилятор консольно установлен на валу у опоры 1 и ее подшипник был наиболее изношен. Все подшипники смазывали смазкой Литол-24. Об уровне износа опор вала судили по амплитуде вертикального виброперемещения элементов подшипниковых узлов. Но 26.07.2001 г. во все четыре подшипника вала был заложен Литол-24 с 5 мас. % ресурсовосстанавливающей добавки АРВК. Выравнивание величин виброперемещений на всех четырех подшипниках благодаря образованию в них трибопокрытий контролировали до 15.10.2003. Разница между виброперемещениями вала в опорах постепенно уменьшалась (табл. 1), так как интенсивнее снижались виброперемещения в наиболее изношенных опорах, особенно – в первой, в то время как на менее изношенных подшипниках виброперемещения изменялись меньше.

Это можно объяснить образованием в наиболее нагруженных опорах более толстых покрытий, чем в менее нагруженных опорах.

Автогенерируемые покрытия, образующиеся на изношенных поверхностях трения, в пределе могут полностью компенсировать износ, их толщина может составлять от 5 до 15 и более мкм. Расчеты показали, что объем трибопокрытий может в 25 раз превышать объем введенного в масла порошка ГМТ [10]. Из этого следует, что в образовании защитного покрытия принимают участие и другие вещества трибосреды: например, компоненты смазок, окружающей среды и продукты изнашивания.

Более удивительное свойство ГМТ-покрытий заключается в том, что они обеспечивают работу сопряжений трения без масла, что подтверждено неоднократными испытаниями ГМТ-приработанных ДВС многих легковых автомобилей, тяговых редукторов трамваев и тепловозов, разных редукторов промышленного оборудования. Так известны полномасштабная работа без масла дизеля автосамосвала в Китае, работа без масла ГМТ-приработанного ДВС ЗИЛ-130 и многие другие примеры безаварийной работы автотранспорта без масла, демонстративно слитого или потерянного в ДТП [10, 14], что объясняется высокой маслосъемкостью ГМТ-покрытий.

Механизмы смазочного действия: состав, строение и свойства покрытий. Чтобы выявить механизм триботехнического действия серпентинсодержащих смазок необходимо, прежде всего, оценить состав и строение покрытий, образующихся в термически и нагрузочно активируемой трибосистеме “металл–серпентинсодержащее масло–металл” при переходе в трибосистему “металл–покрытие–масло–покрытие–металл” исследуют трибологические характеристики покрытий, их способность к автокомпенсации износа, а также снижение потерь на трение в режиме граничной смазки.

Исследования проводились как непосредственно на узлах трения (например, на сопряжениях поршневое кольцо–гильза цилиндра ДВС локомотива [15]), так и на лабораторных трибометрах [10, 15, 25]. В качестве исследуемой смазочной среды использовали суспензии ГМТ в промышленных или в модельных маслах, а в ряде случаев вводили и некоторые “катализаторы”. Для исследования поверхностей применяли оптическую и электронную микроскопию, послонную Оже-спектроскопию, рентгеноспектральный анализ, рамановскую спектроскопию, профилографирование поверхностей, оценку их микро-/наномеханических характеристик и др. Результаты этих исследований позволяют установить ряд закономерностей образования ГМТ-покрытий. Так в [15] установлено, что на поверхностях гильз цилиндров ДВС локомотива, прошедшего 500 тыс. км с добавкой в моторное масло порошка серпентина+неназванного “катализатора”, образовалось трибопокрытие толщиной 8–10 мкм. Микротвердость покрытия по Виккерсу по наношкале вдвое превышала микротвердость детали. Минимальная нанотвердость покрытия составляла 12.7 ГПа, модуль упругости 240 ГПа (их отношение равно 0.06, что, согласно [15, 26], свидетельствует о прекрасных фрикционно-износных характеристиках трибосопряжений). Электрическое сопротивление ГМТ-покрытий составляет от 10–300 Ом/см до 5 кОм/см, оно пористо, в тонком слое прозрачно, маслофильно, не травится азотной кислотой, прочно закреплено на металле, окрашивается, имеет цвет от желто-золотистого до сиреневого и сероватого, полностью разрушается от электрического воздействия, образуется в основном, на стальных поверхностях.

Антифрикционные характеристики ГМТ-покрытия оценивали на трибометре TRB-S-DE [10] на лабораторной машине трения SRV [15]. Образцы для трибологических испытаний в [15] были вырезаны из деталей исследованного китайского тепловозного дизеля, смазочной средой было масло SD/CC, SAE 40 с той же добавкой АРТ, испытанной в эксплуатации этого же дизеля. После 240 ч испытаний на поверхностях образцов образовалось покрытие толщиной 2 мкм, нанотвердость которого составляла 13.32 ГПа, а модуль упругости – 240 МПа. Коэффициент трения в щадящих нагрузочно-скоростных режимах составлял 0.005, что близко к эффекту сверхскользкости.

Исследование элементного состава покрытия [15] показало, что в наружном его слое сосредоточены в основном более легкие элементы, чем во внутреннем, лежащем

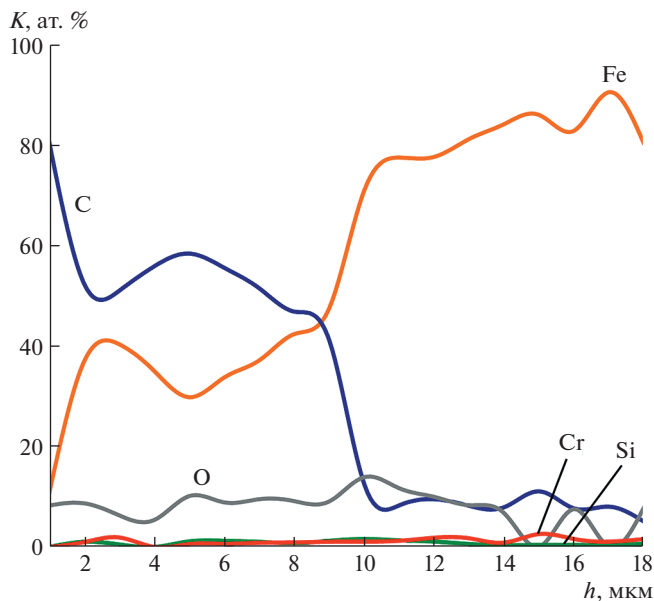


Рис. 3. Динамика содержания основных элементов в ГМТ-покрытии от основания до его поверхности [14].

на подложке. Было установлено, что основными элементами, образующими ГМТ-покрытие, являются углерод, кислород, железо. Естественно, они находятся в составе различных химических соединений. Но магний и кремний, являющиеся основными компонентами серпентинов, в составе исследуемого [15] покрытия практически не обнаружены. Динамика содержания основных химических элементов K по глубине h ГМТ-покрытия была определена по заданию НПО «Руспромремонт» в Центре Semic (Хельсинки, рис. 3).

По мере роста толщины покрытия содержание углерода в нем увеличивается, а железа уменьшается и поверхность покрытия состоит в основном из углерода с небольшим содержанием железа (рис. 3). Кислород, как составная часть продуктов трибоокисления масел, во всем слое покрытия постоянен и составляет около 10 ат. %.

Из рис. 3 видно, что в покрытии имеются лишь следы кремния и не выявлен магний, что соответствует крайне незначительному их содержанию в ГМТ, вводимого концентрацией 0.01–0.05, а содержания магния и кремния при этом составляет 0.0022–0.012 мас. %, т.е. эти элементы, выявляемые лишь высокочувствительным анализом.

Наличие углерода, по-видимому, объясняется пиролизом и карбонизацией смазочных материалов на активированной с ГМТ поверхности трения или поглощением углерода из окружающей среды (например, из CO_2), а железа — из продуктов изнашивания. Трибопокрытия из ГМТ несколько различаются [10, 17], но все их поверхности содержат углерод. Так, в [15] Оже-спектроскопией микроанализатором Link, было установлено, что при трении стали по стали в серпентиновой среде в слое покрытия толщиной до 4.0 нм от подложки были обнаружены пики Mg, Si и C, но выше 15 нм — только углерод.

ГМТ-покрытия характеризуются комплексом высоких значений таких характеристик, как нанотвердость, модуль упругости, чистота поверхности, износостойкость, низкая взаимная адгезия, низкий коэффициент трения и химическая инертность, ка-

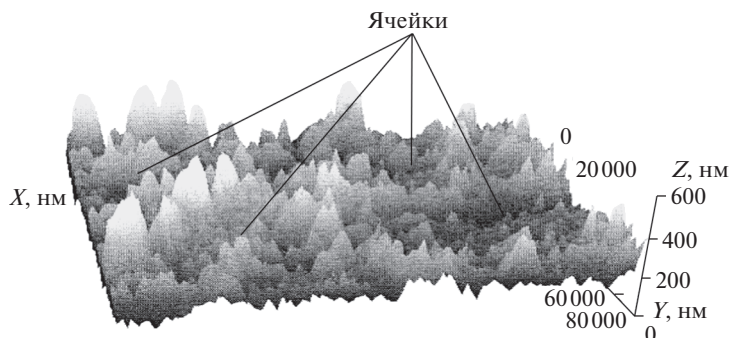


Рис. 4. Топография изношенной в среде с ГМТ стальной поверхности как ячеистой сталагмитовой структурой на гранях кристаллов металлов, удерживающей трибополимер с радикальными фрагментами и смазку, на которой и растет ГМТ-покрытие [10].

кими не обладают классические твердосмазочные покрытия [27]. Высокая твердость поверхности ГМТ-покрытий и их состав характерны для алмазоподобного углерода, поэтому такие покрытия получили название алмазоподобных углеродных пленок (DLC-films).

Основные физико-механические и трибологические характеристики DLC-films можно варьировать путем направленного выбора технологии их нанесения или легирования различными химическими элементами. При этом установившиеся значения коэффициента трения могут варьироваться от 0.001 до 0.7 [27, 28]. В тяжелых условиях низкое трение DLC-films обеспечивается за счет графитизации тончайших поверхностных слоев, обеспечивающей положительный градиент их механических свойств по глубине [29].

Приводим и другие представления о триботехническом действии серпентинов. Так, согласно автору [3], истертые частицы серпентина с оборванными химическими связями при соединении обрывков силоксанов с поверхностями трения, адсорбируют атомарный водород, вместе с гидроксидами железа, магнетитом и другими компонентами образуют начальные пленки, которые предотвращают водородное изнашивание, обеспечивают низкое трение и наращивание ресурсовосстанавливающего покрытия.

Согласно авторам [19], ювенильные поверхности трения, открываемые абразивным действием частиц ГМТ, с их физико-химической активностью образуют на гранях кристаллов металлов минеральный сталагмитовый ячеистый пространственный каркас (рис. 4). На этом каркасе, как вторичный процесс, и идет пленочная трибополимеризация аморфного микропористого покрытия с высокой сорбцией масел.

Можно согласиться, что одним из первых этапов наращивания ГМТ-покрытий, но после открытия ювенильных поверхностей трения, может быть образование на сопряженных поверхностях трения ячеистых сталагмитообразных структур, на остриях или в ячейках которых благодаря радикальным фрагментам [19] образуется трибополимер, осуществляющий смазочное действие.

Но эти модели не объясняют механизм наращивания ГМТ-покрытий, удаленных от поверхностей трущихся тел на десятки и сотни мкм, в том числе и без масла, образование подобных покрытий при стрельбе в стволах орудий и оружия, при натирании холодного оружия (шашек) и колес локомотивов на сухую, при вибронатирке деталей в водной суспензии ГМТ [10] наращивание толстых ГМТ-покрытий в маслах и без них идет, возможно, благодаря уникальной трибоактивности атомов углерода в синтезе ими новообразований, отмеченной автором [30]. В других случаях, возможны и

иные процессы, предполагавшиеся пионерами применения геомодификатора трения в конце XX—начале XXI века [3, 10, 11, 17].

Заключение. В статье рассмотрены проблемы образования, эффективности применения и механизма действия наиболее перспективного геомодификатора трения второго поколения — серпентина в качестве антифрикционной, противоизносной и ресурсовосстанавливающей добавки к смазочным материалам. Показано, что условиями образования ГМТ-покрытий являются: предварительная очистка поверхностей трения мягким абразивом, их активация, эмиссия трибоэлектронов высоких энергий, повышение контактных температур и давлений и, как следствие, механо-термо-химические преобразования частиц ГМТ с выделением ими конституционной воды. Механизм обеспечения эффекта сверхскользкости обусловлен пиролизом, карбонизацией и трибополимеризацией компонентов смазочных сред. Он обеспечивает образование алмазоподобных покрытий, и графитизацию тончайших их слоев. При этом покрытия приобретают высокую нанотвердость порядка 13 ГПа, модуль упругости порядка 240 ГПа, зеркальную чистоту, минимальную склонность к схватыванию, уникальную скользкость и низкое трение. ГМТ-покрытия пористы, в тонком слое, прозрачны, маслофильны, не травятся, имеют сопротивление от 10–300 Ом/см до 5 кОм/см, снижают коэффициент трения в обычных условиях до 0.03–0.04 и продлевают ресурс работы трибосоразжений в 1.5–3 раза. Но полное раскрытие механизма действия геомодификатора трения требует дальнейших углубленных исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доценко А.И., Буяновский И.А. Триботехника. М.: ИНФРА-М. 2020. 399 с.
2. Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Любинин И.А. Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический эффект. Киев: Атика-Н. 2012. 292 с.
3. Зуев В.В. Конституция, свойства минералов и строение Земли (энергетические аспекты). СПб.: Наука. 2005. 400 с.
4. Carmignano O.R.D.R. et al. Serpentinites: mineral structure, properties and technological applications // Journal of the Brazilian Chemical Society. 2020. V. 31. № 1. P. 2.
5. Yu H. et al. Microstructure, mechanical properties and tribological behavior of tribofilm generated from natural serpentine mineral powders as lubricant additive // Wear. 2013. V. 297. № 1–2. P. 802.
6. Wang X. et al. The effect of serpentine additive on energy-saving and auto-reconditioning surface layer formation // Industrial Lubrication and Tribology. 2017. V. 69. № 2. P. 158.
7. Yin Y.L. et al. Friction and wear behaviors of steel/bronze tribopairs lubricated by oil with serpentine natural mineral additive // Wear. 2020. V. 456. P. 203387.
8. Чичинадзе А.В., Албагачиев А.Ю. Исследование добавки Форсан при трении // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 8. С. 28.
9. Буяновский И.А., Дроздов Ю.Н., Гостев Ю.В. и др. Антифрикционная ресурсовосстанавливающая композиция присадок для пластичных смазок // Вестник машиностроения. 2005. № 7. С. 34.
10. Дунаев А.В., Филиппова Е.М. Нетрадиционная триботехника для повышения ресурса авто-тракторной техники. Итоги 25-летнего развития. М.: ГОСНИТИ, 2017. 252 с.
11. Маринич Т.Л., Машков Ю.К., Чечуков Н.Т. Устойчивая система трибофункционирования // В кн.: Трение, износ и смазочные материалы: Труды международной научной конференции, Ташкент, 22–26 мая 1985 г. В 3-х томах. Т. 2. С. 311.
12. Балабанов В.И. Безразборное восстановление трущихся соединений автомобиля. М.: Астель АСТ, 2002. 60 с.

13. *Погодаев Л.И., Буяновский И.А. Крюков Е.Ю. и др.* К механизму взаимодействия природных слоистых гидросиликатов с поверхностями трения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 5. С. 71.
14. *Дунаев А.В., Зувев В.В., Васильков Д.В.* Гипотезы механизмов ремонтно-восстановительных серпентиновых трибопрепаратов // Нанотехника. 2012. № 4 (32). С. 58.
15. *Jin Yu., Li Sh.* Superlubricity of *in situ* generated protective layer on worn metal surfaces in presence of $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ – In book: Superlubricity / Edited by *A. Erdemir and J.J. Martin*. Amsterdam: Elsevier, 2007. P. 445.
16. *Погодаев Л.И., Кузьмин В.М.* Структурно-энергетические модели надежности материалов и машин. СПб.: Академия транспорта РФ, 2006. 608 с.
17. *Телух Д.М., Кузьмин В.П., Усачев В.В.* Введение в проблему использования природных слоистых гидросиликатов в трибосопряжениях / Интернет-журнал “Трение, износ, смазка”. 2009. № 3. С. 13.
18. *Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Глазунова Е.А.* Влияние примесей магнетита на трибологические свойства смазочных композиций, содержащих минеральные модификаторы трения // Трение и износ. 2011. Т. 32. № 2. С. 143.
19. *Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Пономаренко А.Г. и др.* Структура смазочных слоев, формируемых при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 5. С. 516.
20. *Qin Y., Wang L., Yang G. et al.* Characterisation of self-repairing layer formed by oleic acid modified magnesium silicate hydroxide // Lubrication Science. 2021. V. 33. № 3. P. 113.
21. *Wang B. et al.* Nano serpentine powders as lubricant additive: tribological behaviors and self-repairing performance on worn surface // Nanomaterials. 2020. V. 10. № 5. P. 922.
22. *Белый И.Ф., Меркулов А.Ф., Белый В.И., Голубев И.Г.* Эффективное использование антифрикционных добавок к трансмиссионным и моторным маслам. М.: ФГНУ “Рос-информатротех”. 2011. 52 с.
23. *Yu H.L. et al.* Effect of thermal activation on the tribological behaviours of serpentine ultrafine powders as an additive in liquid paraffin // Tribology International. 2011. V. 44. № 12. P. 1736.
24. *Медведева В.В.* Повышение триботехнических характеристик консистентных смазочных материалов путем применения дисперсных частиц гидросиликатов магния // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во СПб политех. университет Петра Великого, 2018. 18 с.
25. *Singh D. et al.* Friction reduction capabilities of silicate compounds used in an engine lubricant on worn surfaces // Advances in Tribology. 2016. V. 2016.
26. *Leyland A., Matthews A.* On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour // Wear. 2000. V. 246. № 1–2. P. 1.
27. *Буяновский И.А., Левченко В.А., Игнатьева З.В. и др.* Трибологические характеристики углеродных алмазоподобных покрытий стальных деталей, функционирующих в смазочных средах // В кн: Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин. М.: ЛЕНАНД, 2013. С. 37.
28. *Tyagi A. et al.* A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. V. 78. P. 107.
29. *Aboua K.A.M. et al.* Effect of Mating Material and Graphitization on Wear of aC: H Coating in Boundary Base Oil Lubrication // Tribology Letters. 2020. V. 68. № 1. P. 1.
30. *Канарев Ф.М.* Теоретические основы физхимии нанотехнологий. 2-е издание. Краснодар: КГАУ, 2008. 675 с.