
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.891:539.2

ЛЕГИРОВАНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРУЩИХСЯ ТЕЛ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ СРЕД

© 2021 г. И. А. Буяновский^{1,*}, В. А. Левченко², В. Д. Самусенко¹, А. Н. Большаков¹

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

² Университет Тайджоу, г. Тайджоу, Китай

*e-mail: buyan37@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2021 г.

После доработки 02.08.2021 г.

Принята к публикации 24.08.2021 г.

Рассмотрены возможности повышения антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов при трении в режиме граничной смазки легированием углеродных покрытий контактирующих деталей смазываемых узлов трения различными элементами Периодической системы. Результаты исследования трибологических характеристик таких покрытий показали эффективность их легирования вольфрамом, молибденом, титаном и кремнием в ряде модельных смазочных сред.

Ключевые слова: углеродные алмазоподобные покрытия, трибологические испытания, граничная смазка, коэффициент трения, трибохимическая реакция

DOI: 10.31857/S0235711921060055

Как известно, наиболее жестким режимом, в котором функционируют смазываемые узлы трения машин и механизмов практически любого назначения, является режим граничной смазки, при котором поверхности трения не разделены сплошным слоем жидкого или пластичного смазочного материала, а имеет место непосредственный металлический контакт, приводящий к их повышенному износу, к значительным энергетическим потерям и, в конечном счете, к заеданию этого трибосопряжения, которое предотвращается (или хотя бы минимизируется) только в результате образования смазочных слоев на границе трущихся тел, при взаимодействии поверхностных слоев контактирующих тел, с активными компонентами смазочной среды [1]. Следовательно, для повышения эффективности процесса граничной смазки материалы трущихся тел должны с одной стороны, обеспечить взаимодействие с активными компонентами смазочного материала, образуя граничный слой, минимизирующий участки металлического контакта, а с другой стороны — обеспечить низкое трение и малый износ при сухом трении на участках металлического контакта.

Многочисленные исследования, проведенные в последние десятилетия, показали, что роль такого материала, успешно выполняющего углеродные алмазоподобные покрытия (DLC-покрытия). Эти покрытия обеспечивают поверхностям деталей, на которые они нанесены, значительную твердость, износостойкость и химическую инертность, в результате чего сопротивление перемещению твердых тел на участках металлического контакта, а также интенсивность изнашивания на этих участках незначительны. Легирование алмазоподобных покрытий рядом элементов Периодической системы позволяет поверхностному слою таких покрытий взаимодействовать с активными компо-

нентами смазочной среды, образуя на поверхностях раздела контактирующих тел модифицированные слои, обладающие низким сопротивлением сдвигу, что обеспечивает смазываемому трибосопряжению прекрасные антифрикционные свойства [2–4]. Таким образом, согласно остроумному замечанию авторов [4], “антифрикционные и противоизносные характеристики DLC-покрытий и реакционная способность металлов объединены в едином материале”.

Ниже будут кратко рассмотрены методы нанесения алмазоподобных углеродных покрытий на исследуемые образцы для трибологических испытаний и методы трибологических испытаний. Затем будут приведены результаты исследований влияния легирования ряда перспективных DLC-покрытий некоторыми характерными элементами Периодической системы на антифрикционные свойства модельных смазочных композиций и товарных масел. В заключение будут подытожены результаты трибологических испытаний и даны рекомендации по выбору сочетаний состава и структуры DLC-покрытий и природы смазочных сред.

Цель статьи — оценить уровень влияния наиболее перспективных элементов, легирующих углеродные алмазоподобные покрытия трущихся тел на антифрикционные и противоизносные свойства смазочных сред и выявить основные тенденции выбора оптимальных легирующих элементов для конкретных условий работы узлов трения.

Материалы и методы получения. Углеродные покрытия. Как известно, углерод имеет три основные аллотропические модификации, отличающиеся характером связей между атомами углерода, а отсюда — строением и свойствами: графит (sp^2 гибридизация), алмаз (sp^3 гибридизация) и карбин (sp^1 гибридизация). Алмазоподобные покрытия в основном состоят из атомов углерода, как с алмазными, так и с графитоподобными связями. Карбин — это линейный полимер углерода. Он может быть линейным или образовать циклические структуры. Линейно-цепочечное строение характерно для монокристаллических углеродных покрытий, имеющих свойство ориентанта.

Поэтому широкий спектр структур алмазоподобных покрытий обусловлен зависимостью их физических свойств от соотношения алмазоподобных и графитоподобных углеродных связей. Значительное влияние на трибологические характеристики АПП оказывает наличие водорода и/или азота в структуре покрытия, наличие и природа легирующих элементов [6, 7], а также сочетание легирующих элементов и активности (поверхностной и/или химической) смазочной среды.

В настоящее время для получения углеродных пленок применяются различные методы осаждения: физического осаждения из газовой фазы (PVD), химического осаждения из газовой фазы (CVD), плазменного химического осаждения из газовой фазы (PACVD), ионно-плазменного осаждения, высокочастотного магнетронного распыления и т.д. [6, 7]. Покрытие монокристаллическим углеродом, обладающее свойством ориентанта, синтезируют с использованием ионно-плазменного метода распыления графитовых мишеней с одновременным стимулированием ионами аргона этого покрытия, осаждаемого на поверхности образцов методом импульсной конденсации углеродной плазмы [8].

На рабочие поверхности образцов при лабораторных трибологических испытаниях наносят DLC-покрытия в соответствии с приведенными методиками. Эти образцы в основном представляют собой пластины, цилиндры, шары (обычно, это стандартные подшипниковые шарики или ролики). Трибологические испытания проводят в ряде инактивных, поверхностно-активных и химически активных сред, а также в некоторых товарных маслах.

Методы и средства трибологических испытаний. Оценка трибологических характеристик исследуемых смазочных сред в режиме граничной смазки при трении деталей с нанесенными на них покрытиями алмазоподобного углерода (или при трении стальных деталей по деталям с покрытием алмазоподобным углеродом) в подавляющем большинстве анализируемых исследований проводилась на известных лабораторных

Таблица 1. Коэффициенты трения стали по стали и стали по DLC- и W-DLC-покрытию в модельных смазочных средах (по данным [9, 10])

Пара трения	Смазочный материал				
	ПАО	ПАО + EP _{мин}	ПАО + EP _{опт}	ПАО + AW _{мин}	ПАО + AW _{опт}
сталь/сталь	0.25	0.16	0.16	0.17	0.16
сталь/DLC	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15
сталь/W-DLC	0.13	0.13	0.08	0.13	0.15

Примечание: EP_{мин} и EP_{опт} – противозадирная присадка в малой и оптимальной концентрации соответственно; AW_{мин} и AW_{опт} – противоизносная присадка в малой и оптимальной концентрации.

установках (машинах трения), воспроизводящих точечный или линейный начальный контакт исследуемых образцов, реже – контакт по площади [2–4].

В настоящей статье используются две принципиальные схемы трибологических испытаний: трение двух одноименных образцов, на каждый из которых нанесено исследуемое покрытие (DLC/DLC), и трение стального образца по образцу, на который нанесено исследуемое покрытие (сталь/DLC). В первом варианте исследователь стремится исключить влияние другого материала на оценку трибологических характеристик покрытия, во втором – ставит задачей воспроизвести изнашивание стандартным образцом-контртелом DLC, нанесенным на исследуемый образец.

Трибологические свойства легированных DLC в смазываемых узлах трения. Исследование DLC, легированных вольфрамом/молибденом. Одним из наиболее широко исследованных легированных DLC, является покрытие, легированное вольфрамом (W-DLC). Наиболее последовательно эти покрытия изучал Б. Подгорник [9, 10]. Исследованные покрытия имели многослойное строение в виде попеременных слоев карбида вольфрама и аморфного гидрогенизированного углерода a-C:H, которые методом PACVD наносили на рабочие поверхности образцов при температуре 230°C. Толщина исследуемых покрытий составляла 2 мкм. В процессе исследования было изучено трение на машине трения с перекрещенными стальными цилиндрами. В различных смазочных средах исследовалось влияние легирования алмазоподобных покрытий вольфрамом при трении покрытия по покрытию, покрытия по стали, стали по покрытию. Значительный интерес представляют результаты исследования, в которых сравнивались результаты измерения трения стали по стали, стали по гидрогенизированному алмазоподобному покрытию и по этому же покрытию, легированному вольфрамом, при смазке полиальфаолефиновым маслом ПАО, а также в этом масле с противозадиной (EP) и антифрикционной (AW) присадками, испытанными при различных концентрациях. Обобщенные результаты этих экспериментов представлены в табл. 1.

В той же серии исследований было установлено, что при трении стали по DLC в среде инертного масла ПАО, смазывание осуществляется за счет переноса углеродного покрытия на стальное контртело, вследствие чего коэффициент трения уменьшается с 0.25, полученного для пары трения сталь/сталь, до 0.15 для пары сталь/DLC, как это видно из табл. 1, в которой также приведены результаты исследования влияния содержания в масле ПАО EP- и AW-присадок в концентрациях от 0.1 до 10% применительно к трению стального шарика из стали AISI 52100 по пластинам из той же стали соответственно без покрытия, и с покрытиями DLC и покрытиями W-DLC на значения коэффициентов трения после 72000 циклов испытаний.

В процессе исследования авторами [9, 10] установлено, что легирование вольфрамом алмазоподобного покрытия обеспечивает при трении по стали в серосодержащей смазочной среде (в данном случае – в растворе серосодержащей EP-присадки в ПАО)

заметное снижение коэффициента трения по сравнению с нелегированным покрытием, причем уровень снижения коэффициента трения определяется концентрацией серосодержащей присадки в базовом масле. Исследование дорожек износа на непокрытых стальных образцах методами оптической и сканирующей электронной микроскопии показали, что после трибологических испытаний пары трения сталь/W-DLC на поверхностях этих дорожек образуются “пластинчатые” пленки дисульфида вольфрама WS_2 -продукта трибохимической реакции серы, содержащейся в EP-присадке, с вольфрамом, легирующим DLC покрытие. Как отмечают авторы [10], эти пленки “обладают трибологическими свойствами, аналогичными MoS_2 ”. Одновременно было показано, что концентрация присадок определяет толщину, плотность и скорость образования пленки, обеспечивая тем самым оптимальные условия для проявления антифрикционного эффекта. При малой концентрации присадки (ниже 0.5%) в трибологическом контакте не образуются достаточно сплошные и плотные пленки, содержащие WS_2 , так что коэффициенты трения будут мало отличаться от тех, которые наблюдались при смазывании базовым маслом. При концентрации порядка 2–5% присадки обеспечивают оптимальный трибологический эффект, включая высокую скорость реализации антифрикционного эффекта, поскольку при этих концентрациях наблюдается образование достаточно толстой пленки, содержащей WS_2 и надежно разделяющей трущиеся поверхности. Согласно табл. 1, при оптимальной концентрации присадки EP_{opt} коэффициент трения снижается с 0.14 при трении в базовом масле до 0.08 при трении в масле с EP-присадкой, т.е. более, чем на 40%. В то же время, при концентрации присадки десять и более процентов толщина покрытия повышается настолько, что пленка теряет прочность, разрушается (особенно при высоких нагрузках) и коэффициент трения повышается до значений коэффициента трения для пары сталь/сталь, особенно при высоких нагрузках.

Для исследуемой AW-присадки коэффициент трения изменяется в меньшем диапазоне значений, что, по-видимому, объясняется существенно меньшей активностью ингредиентов этой присадки по сравнению с EP-присадкой.

Существенно меньше исследований посвящено влиянию содержания вольфрама в легированном DLC покрытии на смазочную способность масел. Авторы работы [11] провели такое исследование применительно к четырем одноименным парам трения W-DLC/W-DLC (a-C:H:W/a-C:H:W), содержащим соответственно 12, 14, 18 и 21 ат. %W и дополнительно к паре трения a-C:H/a-C:H при смазывании базовым маслом API Group III, имеющим динамическую вязкость 16.3 ГПа^{-1} , и тем же маслом с присадкой ДТФЦ (диалкилдитиофосфат цинка) в концентрации, обеспечивающей содержание в масле 0.08 масс. % P.

Результаты трибологических исследований на установке МТМ, осуществляющей схему трения “вращающийся шар по вращающемуся диску” при скорости относительного перемещения 0.01 м/с, осевой нагрузке на шарик 31 Н и температуре масла 100°C приведены на рис. 1.

Таким образом, в интервале значений содержаний вольфрама 12–21 ат. % при практически одинаковом содержании водорода в сравниваемых образцах покрытий наблюдаются близкие значения коэффициентов трения – порядка 0.08–0.1, причем, если при испытании в базовом масле коэффициент трения при содержании вольфрама 18 ат. % снижается до 0.06, то в масле с присадкой ДТФЦ коэффициент трения повышается до общего уровня 0.1.

Ниже будет рассмотрено влияние на антифрикционные свойства двух модельных смазочных сред (инактивного полиальфаолефинового масла ПАО-4 + 1% диалкилдитиофосфата цинка ДТФЦ и ПАО-4 + 1% дитиокарбамата молибдена ДТКМ) легирования монокристаллического углерода (МКУ) m-C вольфрамом, а также другим тугоплавким переходным металлом – **молибденом** [12] и для сравнения – кремнием. Обе

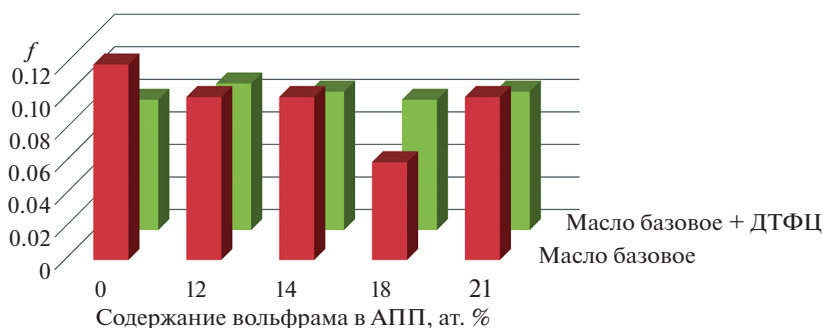


Рис. 1. Гистограмма, описывающая влияние содержания вольфрама в DLC на коэффициенты трения при смазке базовым маслом API Group III и этим же маслом с присадкой ДТФЦ (по данным [11]).

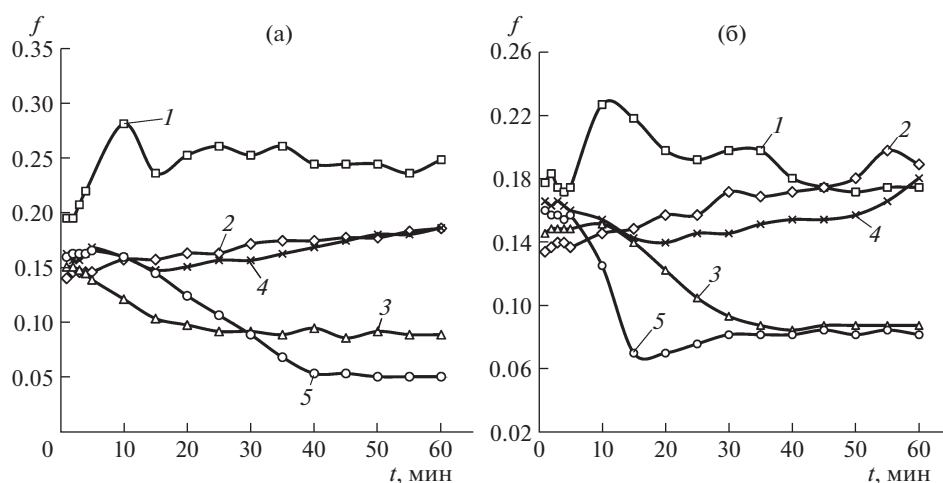


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний при смазке маслом ПАО-4 + 1% ДТФЦ (а) и маслом ПАО-4 + 1% ДТКМ (б), где пары трения: 1 – сталь/сталь; 2 – сталь/МКУ; 3 – сталь/W-МКУ; 4 – сталь/Si-МКУ; 5 – сталь/Mo-МКУ (по данным [12]).

сравниваемые присадки – серосодержащие, ДТФЦ – противоизносная присадка, а ДТКМ – антифрикционная [1]. Испытания проводили на четырехшариковой машине КТ-2 по схеме трения шар/три ролика при осевой нагрузке на узел трения 108 Н и частоте вращения 1 мин^{-1} .

Результаты испытаний представлены на рис. 2 в виде зависимостей коэффициентов трения от продолжительности испытаний.

Приведенные результаты объясняются тем, что в серосодержащей среде содержащиеся в покрытиях вольфрам (как и в работе [10]) и молибден вступают во взаимодействие с серой, выделяемой серосодержащими присадками вследствие трибохимического их разложения, и образуют дисульфиды соответственно вольфрама и молибдена, которые, будучи эффективными твердыми смазками, резко снижают коэффициенты трения. И нелегированное МКУ-покрытие (рис. 2, кривые 2), и МКУ-покрытие, легированное кремнием (рис. 2, кривые 4), снижают трение по сравнению с трением стали по

Таблица 2. Установившиеся значения коэффициентов трения при трибологических испытаниях покрытий легированных Ti (по данным [13])

№/№	Пара трения	Базовое масло ПАО-4 с присадками		
		—	MoDTP	MoDTP+ZnDTP
1	сталь/сталь	0.20	0.05	0.060
2	a-C:H ₁ /сталь	0.10	—	0.050
3	a-C:H ₁ /a-C:H	0.075	0.06	0.048
4	Ti-C:H/сталь	0.075	—	0.057
5	Ti-C:H/Ti-C:H	0.067	0.05	0.057

стали в исследуемом масле (рис. 2, кривые 1), но существенно меньше, чем W-MKY- и Mo-MKY углеродные покрытия (рис. 2, кривые 3 и 5 соответственно).

Исследование DLC, легированных титаном. Элементом, применяемым для легирования алмазоподобных углеродных покрытий рабочих поверхностей элементов смазанных узлов трения, является также титан [2–5, 13, 14].

Авторы работы [13] исследовали влияние легирования аморфных гидрогенизированных углеродных покрытий титаном на антифрикционные свойства трех смазочных сред: базового масла ПАО-4, а также этого же масла с присадками ДТКМ и ДТКМ+ДТФЦ (в концентрациях соответственно 200 ppm по молибдену и 700 ppm по цинку). Результаты этих испытаний приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при трении по стали в среде базового масла ПАО-4 нанесение на изнашиваемый стальной образец гидрогенизированного алмазоподобного покрытия при той же смазке позволило вдвое (с 0.2 до 0.1) снизить коэффициенты трения по сравнению с парой трения сталь/сталь. Далее при трении стальных образцов, каждый из которых покрыт тем же покрытием, коэффициент трения в базовом масле снижается уже до 0.075. Такой же коэффициент трения был получен при трении стали по такому же покрытию, легированному титаном. Наконец, когда на оба трущихся образца нанесено аналогичное покрытие, т.е. для пары трения Ti-C:H/Ti-C:H, коэффициент трения для смазки базовым маслом становится минимальным – 0.067. При смазке маслом ПАО с присадкой дитиокарбамата молибдена для сравниваемых сочетаний трущихся поверхностей мало меняется ($f = 0.05–0.06$). Аналогичные результаты получены при испытании этих пар трения маслом ПАО-4 с комплексом присадок ДТКМ+ДТФЦ: изменение материалов трущихся тел мало сказывается на полученных в результате экспериментов авторов [13].

В работе [14] приведены результаты оценки влияния легирования алмазоподобного углеродного покрытия титаном (и для сравнения – такими элементами, как Mg, Co, Ni, Ce), на трибологические характеристики при смазывании как чистым ПАО, так и ПАО с добавкой 1% моноолеата глицерина (ГМО).

Как видно из табл. 3, при испытании в двух средах (инактивной и поверхностно-активной) легирование DLC-покрытия титаном превышает эффект повышения антифрикционных характеристик исследуемых смазочных сред, обеспечиваемый нелегированным покрытием DLC, а также покрытий, легированных никелем или магнием и лишь немного уступает только DLC, легированному кобальтом или цезием [14].

Исследование DLC, легированных кремнием. В качестве элемента, легирующего алмазоподобные покрытия, достаточно широко применяют кремний. Специальных исследований влияния легирования кремнием DLC рабочих поверхностей деталей смазанных узлов трения не так много [4, 5, 12]. По данным [12] легирование покрытия кремнием m-C практически не сказывается на значении коэффициента трения. Авторы [12] приходят к выводу, что для данного материала антифрикционные эффекты от

Таблица 3. Влияние легирования DLC-покрытия на антифрикционные свойства двух смазочных сред (по данным [14])

Тип покрытия	Установившееся значение f	
	ПАО	ПАО + ГМО
DLC	0.15	0.12
Mg-DLC	0.04	0.05
Co-DLC	0.14	0.04
Ni-DLC	0.23	0.07
Ti-DLC	0.09	0.04
Ce-DLC	0.05	0.03

Таблица 4. Коэффициенты трения стальных образцов с покрытиями a-C:H, легированными Ti, W, Si при смазке тремя смазочными средами (по данным [5])

Трущиеся материалы и покрытия	Смазочный материал		
	минеральное масло	минеральное масло + AW/EP	минеральное масло + EP
a-C:H	0.25	0.26	0.30
Ti-DLC	0.30	0.44	0.32
W-DLC	0.31	0.36	0.31
Si-DLC	0.26	0.36	0.32

Условия испытаний: контактное давление 1 ГПа, скорость относительного перемещения 0.1 м/с, температура 80°C.

покрытия и от легирования покрытия не суммируются. Большой интерес представляет исследование [5], в которой анализируется механизм повышения смазочной способности масел при легировании кремнием DLC и его отличие от механизма повышения смазочной способности масел путем легирования углеродных покрытий металлами W и Mo. В работе [15] показано, что при смазывании водой Si-DLC-покрытие обеспечивает коэффициент трения порядка 0.005, что авторы [15] связывают с образованием граничного слоя, содержащего коллоидный кремний.

Обсуждение рассмотренных материалов будет уместно завершить сравнением антифрикционных свойств алмазоподобных покрытий, легированных анализируемыми элементами – Ti, W и Si, оцененных по единой методике одними и теми же операторами [7]. В качестве смазочной среды использовали минеральное масло без присадок, а также с добавлением EP- и AW-присадок. Исследуемые покрытия наносились на оба трущихся стальных образца. Как видно из табл. 4, гидрогенизированное углеродное DLC-(a-C:H)-покрытие обеспечивает меньшее трение, чем легированные DLC.

В то же время, при испытании для всех четырех исследуемых пар трения при смазывании чистым минеральным маслом получены меньшие коэффициенты трения, чем при смазывании этого же масла с AW- и EP-присадками. Возможно, оба полученных результата являются следствием блокирования как легирующими элементами, так и исследуемыми присадками, процесса графитизации тончайшего поверхностного слоя углеродного покрытия, которое реализуется под действием достаточно высоких нагрузок и температур, развивающихся в зоне трибологического контакта, что расширяет области нормального трения [16].

Заключение. Легирование углеродных алмазоподобных покрытий (от гидрогенизированного аморфного а-С:Н до монокристаллического m-С углерода) рядом металлов (W, Mo, Ti, Co, Se и др.) оказывает заметное влияние на трибологические характеристики смазочных сред при граничной смазке.

Образование прочного граничного слоя адсорбционного происхождения можно достигнуть путем применения углеродных покрытий-ориентантов (например, монокристаллического углерода), что позволяет повысить смазочную способность инертного масла до уровня, не менее высокого, чем при добавлении в это масло ПАВ, или путем легирования углеродных алмазоподобных покрытий некоторыми металлами (Co, Se, Ti и т.д.).

При жестких режимах трения и изнашивания граничные слои адсорбционного происхождения не обеспечивают требуемого антифрикционного и противозносного эффекта. В таких случаях на трущихся поверхностях контактирующих тел путем предварительного легирования алмазоподобного покрытия переходными металлами — вольфрамом или молибденом, при трении в смазочной среде, включающей серосодержащую присадку, реализуется трибохимическая реакция с образованием на поверхностях трения несплошного модифицированного слоя, включающего дисульфиды вольфрама или молибдена, которые являются эффективными твердыми смазками. Их образование обеспечивает резкое снижения трения. Серосодержащую присадку для этой смазочной среды следует выбирать, исходя из той контактной температуры, генерируемой в трибологическом контакте, которая достаточна для трибоактивируемого разложения этой присадки с выделением серы.

Алмазоподобное покрытие, легированное кремнием при смазывании водой обеспечивает получение коэффициента трения 0.005.

Легирование водородсодержащих алмазоподобных покрытий различными элементами Периодической системы далеко не всегда обеспечивает заметный антифрикционный эффект. В ряде случаев, такие покрытия позволяют получить достаточно низкий коэффициент трения, причем при легировании различными элементами коэффициент трения только увеличивается, что, по-видимому, является следствием блокирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение, 1968. 542 с.
2. Erdemir A., Donnet C. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects // J. Phys. D. 2006. V. 39. P. R311.
3. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films from first experiments to world-wide applications // Surface and Coatings Technology. 2014. T. 242. C. 214.
4. Zahid R. et al. Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: a review // Tribology Letters. 2015. T. 58. № 2. C. 1.
5. Kalin M., Vižintin J. Differences in the tribological mechanisms when using non-doped, metal-doped (Ti, WC), and non-metal-doped (Si) diamond-like carbon against steel under boundary lubrication, with and without oil additives // Thin solid films. 2006. T. 515. № 4. C. 2734.
6. Семёнов А.П. Трибологические свойства и вакуумно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2009. Т. 31. № 1. С. 83.
7. Хрущов М.М. Легированные алмазоподобные покрытия триботехнического назначения. В кн.: Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин. М.: ЛЕ-НАНД, 2013. С. 78.

8. *Levchenko V., Matveenko V., Buyanovsky I., Ignatieva Z.* Influence of carbon coatings on lubricating properties of boundary layers // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2004. Т. 218. № 6. С. 485.
9. *Podgornik B., Vižintin J.* Tribological reactions between oil additives and DLC coatings for automotive applications // *Surface and Coatings Technology*. 2005. Т. 200. № 5–6. С. 1982.
10. *Podgornik B. et al.* Combination of DLC coatings and EP additives for improved tribological behaviour of boundary lubricated surfaces // *Wear*. 2006. Т. 261. № 1. С. 32.
11. *Vengudusamy B. et al.* Influence of hydrogen and tungsten concentration on the tribological properties of DLC/DLC contacts with ZDDP // *Wear*. 2013. Т. 298. С. 109.
12. *Буюновский И.А., Большаков А.Н., Левченко В.А.* Влияние на антифрикционные свойства смазочных сред легирования ориентирующих углеродных покрытий карбидообразующими элементами // *Трение и износ*. 2018. Т. 39. № 5. С. 471.
13. *De Barros'Bouchet M.I., Martin J.M.* New trends in boundary lubrication of DLC coatings. In: *Tribology of diamond like carbon films. Fundamentals and applications* / Ed. by Donet C. and Erdemir A. NY: Springer. 2008. С. 590.
14. *Miyake S. et al.* Boundary lubrication characteristic of metal-containing diamond-like carbon (DLC) films with poly alpha olefin (PAO) Lubricant // *Tribology Online*. 2008. Т. 3. № 5. С. 310.
15. *Zhao F. et al.* Superlow friction behavior of Si-doped hydrogenated amorphous carbon film in water environment // *Surface and coatings Technology*. 2009. Т. 203. № 8. С. 981.
16. *Aboua K.A.M. et al.* Effect of Mating Material and Graphitization on Wear of a-C:H Coating in Boundary Base Oil Lubrication // *Tribology Letters*. 2020. Т. 68. № 1. С. 1.