

УДК 621.891:539.2

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-2-45-59

ЭФФЕКТЫ УПОРЯДОЧЕНИЯ В АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ С УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ (ОБЗОР)

Ельникова Л. В.^{1,2}, Кузьменко А. П.², Беляев В. В.^{3,4}

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
117218, г. Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, д. 25, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94, Российская Федерация

³ Государственный университет просвещения
141014, Московская обл., г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,
Российская Федерация

⁴ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Российская Федерация

Аннотация

Цель: характеристика применяемых для уменьшения коэффициента трения тонкослойных углеродосодержащих покрытий различных типов и состава, описание принципов их работы в узлах трибосопряжений и эффектов самоорганизации и упорядочения, влияющих на коэффициент трения и износ.

Процедура и методы. Метод анализа литературных источников и классификация исследуемых покрытий по химическому составу, методам нанесения, условиям работы, классификация методов и условий трибологических испытаний, классификация методов характеристики, применяемых к изучаемым покрытиям. Термодинамический анализ фазовых диаграмм по составу углеродосодержащих покрытий.

Результаты. Показано положительное значение легирования углеродных покрытий, применяемых в триботехнических задачах: требуемое уменьшение коэффициента трения и износа. Оценены преимущества и недостатки покрытий с различными типами легирующих элементов (например, металлов IV-V группы, полупроводниковых элементов, водорода) в различных смазочных средах, парах трения и условиях работы. Доказано влияние упорядочения, морфологии частиц и их возможной агрегации за счёт углеродных связей sp^1 , sp^2 , sp^3 и их соотношений в покрытиях на трибологические показатели.

Практическая значимость заключается в раскрытии механизмов влияния легирующих элементов и упорядочения частиц, молекул и агрегатов в покрытиях на коэффициент трения и свойства поверхности трения, вследствие чего возможна оптимизация состава углеродных покрытий для различных технических условий эксплуатации.

Ключевые слова: поверхность конденсированных сред, износ, легирование, присадки, антифрикционные материалы, трение, углеродные покрытия

ORDERING EFFECTS IN ANTIFRICTION MATERIALS WITH CARBON-CONTAINING COATINGS (A REVIEW)

L. Elnikova^{1,2}, A. Kuzmenko², V. Belyaev^{3,4}

¹ *National Research Center "Kurchatov institute"*

ulitsa Bolshaya Cheremushkinskaya 25, Moscow 117128, Russian Federation

² *Southwest State University*

ulitsa 50 let Otyabrya 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ *Federal State University of Education*

ulitsa Very Voloshinoi 24, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation

⁴ *Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba*

ulitsa Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russian Federation

Abstract

Aim. Characterization of applied in tribotechnics thin film carbon containing coatings of different types and compositions, describing of principles of their work in tribological units and effects of their self-organization and ordering, which influence on friction coefficient and wear.

Methodology. Methods of analysis of literature data and classification of coatings under study in chemical composition, methods of their deposition, load conditions, classification of the methods and tribological tests conditions, classification of methods of characterization applied to coatings under study. Thermodynamical analysis of phase diagrams for carbon containing coatings on their compositions.

Results. We demonstrated the positive influence of alloying of carbon coatings applying in tribotechnical tasks: a required decreasing of friction coefficient and wear. Advantages and deficiencies of coatings with different types of alloying elements (for instance, metals of IV-B group, semiconductive elements and hydrogen) in different lubricants, friction units and conditions are estimated. An influence of ordering, particle morphology and their possible aggregation at the cost of carbon bounds sp^1 , sp^2 , sp^3 and their combinations in coatings on tribological characteristics is proven.

Research implications. Practical implication of this study is an ascertainment of mechanisms of an influence of the alloying ingredients and ordering of particles, molecules and their aggregates in coatings on the friction coefficient, thereupon, optimization of contents of carbon coatings for different engineering specifications.

Keywords: surface of condensed media, additives, alloyed, carbon coating, friction, lubricating compositions, wear

Введение

Для достижения эффекта уменьшения трения и износа трущихся деталей антифрикционных материалов в узлах трибосопряжений с конца прошлого столетия начали развиваться направления трибологических исследований углеродосодержащих покрытий, их использование позволяет наблюдать

специфические зависимости коэффициента трения в процессе нагружения во времени [1–4].

После открытия $(2d+1)$ аллотропов углерода (графена, фуллерена, нанотрубок и пр.) их стали применять в триботехнике в качестве наполнителей в полимерных и других матрицах смазочных композиций (СК) [3], так как их свойства индуцировать агрегацию, упорядочение и фазообразование в объёме смазочных сред оказывает влияние на трибологические характеристики. Таким образом, влияние аллотропов углерода на процесс смазки имеет термодинамические аналогии с нанесением на детали углеродных покрытий.

Известны алмазоподобные, графитоподобные углеродные плёнки, аморфный углерод, представляющий их смесь и др., классификация основана на видах sp -гибридизации sp^3/sp^2 [1]. Линейные углеродные цепочки sp^1 образуют слои параллельно поверхности подложки и вызывают образование гексагональной решётки, расстояние между отдельными цепочками в узлах решётки составляет 0,49–0,503 нм, а в целом плёнки представляют собой многослойные структуры [5]. Связи sp^2 определяют степени упорядоченности графита от монокристаллического до стеклоуглерода. Алмазоподобные углеродные покрытия (diamond-like carbon, DLC) обладают уникальными свойствами твёрдости, упругости и пластичности, биосовместимости, адгезии, низким коэффициентом температурного расширения и др. [3; 6]. Как известно, в режиме граничной смазки, в котором работают все тяжелонагруженные узлы трения современных машин, покрытия DLC способствуют существенному понижению коэффициента трения [1].

Углеродные покрытия наносятся на поверхности деталей методами химического осаждения из газовой фазы (CVD), атомно-слоевого осаждения (ALD), молекулярного осаждения, импульсного плазменного осаждения из газовой фазы (PACVD) и др. [7–10].

При работе углеродных покрытий в узлах трения происходят различные химические реакции с элементами смазочных сред (например, масел, полимерной матрицы и пр.) и поверхностями трущихся деталей [1], ориентационные эффекты в жидкокристаллических СК, что в целом определяет характер зависимостей коэффициента трения. Включение мезогенных присадок-ориентантов, легирование углеродных покрытий металлами (молибденом, вольфрамом, титаном, кобальтом, никелем, хромом и др.) или полупроводниками (кремнием, фтором, и др.) также влияет на коэффициент трения.

Мы представим краткий обзор исследований углеродных покрытий, в том числе легированных покрытий, их работы в триботехнических устройствах и смазочных средах. Мы продемонстрируем роль самоорганизации углеродных частиц в покрытиях, их влияние на коэффициент трения и износ деталей.

Треугольник составов

В работах [5; 11; 12] описывается тройная фазовая диаграмма (т. н. «треугольник составов», впервые предложенный Якобом и Меллером [5; 13; 14]), на таком треугольнике составов обозначены структурные типы углеродных фаз, которые могут быть реализованы в покрытиях в зависимости от фазового соотношения отношения sp^3/sp^2 и $[H]$ (рис. 1).

Так, в зависимости от доминирующего типа углеродных связей sp , наличия водорода и др. элементов, в алмазоподобных углеродных покрытиях, полученных вакуумным осаждением, покрытия DLC подразделяются на аморфные безводородные ($a-C$), тетраэдрические безводородные покрытия с высокой долей углеродных атомов, образующих sp^3 алмазные связи ($ta-C$), покрытия, легированные металлом ($a-C:Me$), группу водород-содержащих (гидрогенизированных) покрытий ($a-C:H$, $ta-C:H$, $a-C:H:Me$) и покрытия, легированные неметаллическими элементами ($a-C:H:X$, где «X» обозначены элементы Si, N, O, F, B).

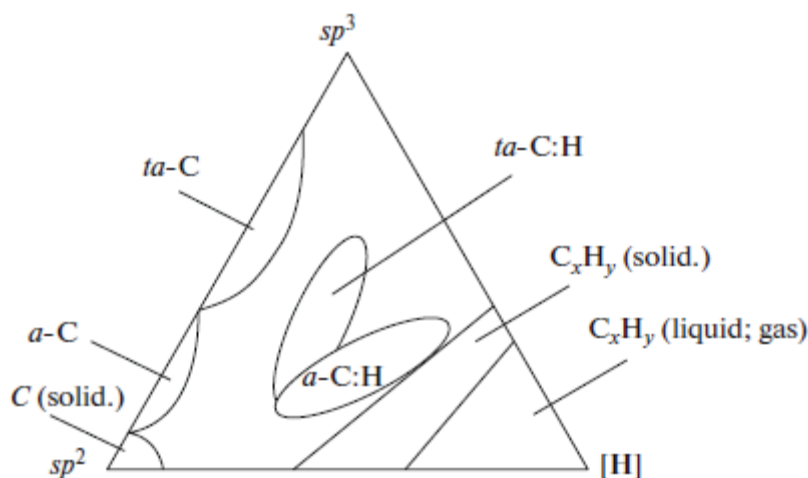


Рис. 1 / Fig. 1. Области сосуществования различных алмазоподобных фаз /
The coexistence regions of different diamond-like phases

Источник: [13].

В обзоре [5] просуммированы данные о модуле Юнга в кристаллографических направлениях $\langle 10\bar{1}0 \rangle$, $\langle 1010 \rangle$, твёрдости, плотности, процентного состава sp^3 для беспримесных покрытий алмаза, фаз $a-C$, $a-C:H$, $ta-C$, $ta-C:H$ и графита. Приведены результаты трибологических испытаний покрытий диаграммы (рис. 1) на стали в режимах граничной, смешанной (полужидкой), гидродинамической и упруго-гидродинамической смазки при различных конфигурациях пар трения («вращающийся диск – неподвижный шар», вращающийся диск – три фиксированных ролика» и пр.).

Для описания трения в различных режимах смазки удобно пользоваться диаграммой Герси-Штрибека [15], которая отображает зависимость

коэффициента трения от величины $\eta v/F$, η – динамическая вязкость масла, v – где скорость относительного смещения трущихся тел, $F = P/l$ – текущая нагрузка на узел трения, P – нагрузка на трибосопряжение длиной l .

Углеродные покрытия, легированные металлами

В работе [16] описываются режимы работы узлов трения с монокристаллическим углеродным покрытием, легированным молибденом. Монокристаллическое покрытие из-за его высокой упорядоченности в процессе работы может служить ориентантом для образования структурно-упорядоченной эпитропной жидкокристаллической (ЖК) фазы углеводородов на подложке [17]. Изучение трибологических свойств покрытий проводилось испытаниями по схеме трения «вращающийся шар – три ролика», покрытие наносилось на ролики. Измерены характеристики: нанотвёрдость, модуль упругости, глубина вдавливания, упругое восстановление. Микроструктура покрытий исследовалась методом электронной дифракции, на просвечивающем аналитическом электронном микроскопе FEI Tecnai G2 F20 с приставкой EDAX, методом просвечивающей электронной микроскопии в режиме сканирования с электронно-зондовым микрорентгеноспектральным анализом элементного состава. Структура покрытия при легировании молибденом меняется с монокристаллической в аморфной матрице на поликристаллический углерод. При этом нанотвёрдость увеличивается на 6%, модуль упругости – на 10%, глубина вдавливания уменьшается на 10%. Коэффициент трения смазочной среды 1% олеиновой кислоты в масле ПАО-4 для пар «сталь-сталь», «сталь – сталь с покрытием», «сталь – сталь с покрытием, легированным Мо» примерно одинаковый, $f=0,15$. Но через 40 минут испытаний для последней пары f снижается до 0,05. В [16] отмечается роль трибохимических реакций в случае покрытия с молибденом только для раствора серосодержащей присадки ДФ11, f снижается с 0,17 до 0,05.

В [18] описаны другие разновидности углеродных покрытий, легированных элементами группы VI-B, в частности, вольфрамом.

Алмазоподобные покрытия для космической техники обсуждались в работе [19]. В данном случае покрытия имеют в своём составе мелкодисперсный порошок MoS_2 , а основной смазочный материал и связующее вещество: фенольные, эпоксидные, кремнийорганические смолы. Твёрдое покрытие практически не испаряется в космической среде, работоспособно в диапазоне температур $-200 \dots 350^\circ\text{C}$, обладает достаточной радиационной стойкостью. Экспериментально установлена оптимальная толщина плёнки покрытия 15 ± 5 мкм. При этом в качестве СК используются пластиковые смазочные материалы ВНИИНП-274Н, ЦИАТИМ-221, НИКА. В [19] исследован характер момента трения и приведённого коэффициента трения от температуры. Также применялись покрытия МДО (нанесённые методом микродугового оксидирования с композиционным материалом на основе углерод-углеродного волокна ЭПАН). В трибоиспытаниях по схемам торцевого нагружения

«кольцо-кольцо» и «вал-штука» вращательного движения в атмосфере воздуха при длительности испытания 120 мин. получены значения коэффициента трения $f=0,006$ при скоростях вращения 0,2 и 1 м/с и удельной нагрузке 0,4 кг/см² для материала МДО-ЭПАН и др. оптимизированные значения [19].

В этом же произведении представлены данные об упрочнении в атмосфере поверхностей с алмазоподобным покрытием, такие поверхности превосходят по износостойкости стальные, включая термообработанные и подвергнутые цементации. Так с покрытием ВНИИП-504 был достигнут $f=0,09-0,1$.

Теоретические расчёты из первых принципов параметров чистых легированных углеродных покрытий на основании модели Хрущева и Малликена с использованием пакета Quantum Espresso приведены в работе ростовских учёных [20] и ссылка в ней с обзором литературных источников. Это данные расчётов для фаз α -C, c -C:H, DLC, DLC:H, DLC:Ar, DLC:Ti, NDC, алмаз, WC, TiC, VC, ZrC, NbC, TaC, а также для фаз с неметаллическими элементами B₄C, α -SiCN, c -Si₃N₄, C₃N₄, c -BN (см. след. раздел) в плёнках толщиной от 20 до 5000 нм по геометрии связей, износостойкости и твёрдости, с указанием метода синтеза.

В [10] приводятся исследования механических свойств алмазоподобных покрытий DLC-1 (толщина 180 нм), DLC-2 (толщина 430 нм) и DLC-PDMS (с полидиметилсилоксаном, толщина 180 нм) по параметрам нормальной нагрузки 5 мН, твёрдости (измеренной методом склерометрии), модулю упругости и коэффициенту упругого восстановления (методом измерительного динамического индентирования). Покрытия имеют широкие области применений и данные [21], полученные по международным стандартам измерений, могут учитываться в триботехнических углах.

Углеродные покрытия с неметаллическими легирующими примесями

В [22] отмечены улучшенные трибологические характеристики при легировании углеродных покрытий хромом и молибденом, Cr и Mo. Проведены испытания на машине трения КТ-2 (со схемой «диск – 3 ролика») работы узлов трения с покрытиями, работающими в смазочных средах ПАО-4, ПАО-4+сурфактант 1% олеиновая кислота (ОА) и ПАО-4+химически активная присадка 2% ДФ11. Покрытие Cr-DLC наносилось на ролики из стали ШХ-15. В зависимости от времени (до 65 мин.) испытаний коэффициент трения f в узле с покрытием без ПАО повышался до 0,62 на 5 минуте, достигал 0,5 на 65 минуте, для чистого ПАО-4 он был достаточно низким: $\sim 0,15$ без скачков в начале испытаний, а для ПАО-4 с присадками 0,125 (для 1% ОА) и в среднем 0,175 для ПАО-4+ 2% ДФ11.

В режиме «сухого» трения антифрикционный эффект в узлах с покрытием Cr-DLC оказывался ниже ($f=0,5$), чем для случая Mo-DLC, $f=0,38$. Также и диаметр области износа: 483 мкм против 300 мкм (Mo-DLC). Но в присутствии СК оба сплава, Cr-DLC и Mo-DLC, работали с хорошим понижением коэффициента трения и износа. Для покрытия Cr-DLC в [22] исследованы

неоднородности рельефа: покрытие ПАО-4+ДФ11 придаёт поверхности шероховатость (коэффициент трения при этом увеличивается с 0,125 до 0,175), а применение чистого ПАО-4 оставляет её более гладкой.

Трибологические свойства легированных плёнок зависят от химического состава, поликристаллической структуры и морфологии поверхности. В обзоре [13] рассматриваются легирующие примеси Si, F, N, B и O в углеродных плёнках и их влияние на коэффициент трения.

В случае покрытий *a*-CN высокий коэффициент трения связан с тем обстоятельством, что атомы азота изменяют поликристаллическую структуру углеродных плёнок и число доступных для возбуждения фононных мод.

В аэрокосмических приложениях трибологии [23] применяются нанокompозитные покрытия WC/DLC/WS₂. Они наносятся гибридным способом магнетронного распыления и импульсного лазерного напыления. Материал таких покрытий представляет собой аморфную матрицу DLC и внедрённые в неё зерна WC и WS₂ размерами 1–2 нм и 5–10 нм соответственно. Как показали испытания по схеме пары трения «шар-диск» в глубоком вакууме, сухом азоте и влажном воздухе, такие покрытия толщиной примерно 0,5 мкм приводят к низкому трению и износу деталей. Также испытания продемонстрировали кристаллизацию и переориентацию первоначально случайно ориентированных зёрен WS₂, графитизацию аморфной матрицы DLC, обратимое упорядочение состава плёнки, перенесённой на контртело, между WS₂ и графитом в условиях циклической работы при изменении окружающей среды от сухой до влажной, возможные совместные действия DLC/WS₂, обеспечивающие снижение трения в окисляющей среде до значений 0,02–0,05.

Свойства покрытий W–C–S с различным содержанием серы 0, 15 и 29 ат% исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а также методом рентгеновской дифракции. При 15 ат% микроструктура изменялась слабо, но при 29 ат% дифракционные и ПЭМ-изображения менялись значительно: ясно различались два типа гексагональных кристаллов WS₂ с различными расстояниями в плоскости (002), а также обнаружены случайно ориентированные зёрна WS₂ размером 5–10 нм. Построены зависимости твёрдости и коэффициента трения при разных содержаниях серы от 0 до 35 ат% в вакууме, сухом азоте и во влажном воздухе [23].

Для исследования износа применялось микрокомбинационное рассеяние (КР) в вакууме. К примеру, гексагональные плоскости WS₂ идентифицировались по пику 400 см⁻¹, также определена ориентация зёрен в процессе трения для 20 ат% WS₂. Однако при содержании серы 20 ат% в WS₂ его гексагональные решётки в контакте не обнаруживались (коэффициент трения высок, 0,5–0,7), но наблюдался аморфный углерод с частичной графитизацией (пики 1380 и 1530 см⁻¹). В воздухе зависимости коэффициента трения усложняются, особенно в интервале концентраций серы 15–20 ат%, из-за трибохимических реакций, окисления и переноса материала с шара. В спектрах КР появлялись пики Fe₂O₃, других оксидов хрома и железа. Тогда при

нагрузках 10–12 ГПа на стали 440С коэффициент трения составлял 0,4–0,5. Но для покрытий с 20 ат% серы он уменьшался до 0,2.

В [24] морфология углеродных покрытий с наночастицами типа «Ni-P-алмаз» изучена методами рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Коэффициент трения с углеродными композитными покрытиями с Ni-P оказался равным 0,18, тогда как для покрытия Ni-P без углерода – 0,47.

Легированные хромом углеродные алмазоподобные покрытия описаны в [6], продемонстрирован их структурный анализ методом СЭМ. Аналогичным покрытиям, Cr-DLC и Cr-H-DLC, наносимым на поверхности трения сплавов AZ91D Mg, посвящена работа [25]. Изучалась микроструктура покрытий, их антикоррозионные свойства в различных средах, коэффициент трения. Испытания проводились при комнатной температуре по схеме трения «шар-диск», контртело шар диаметром 6 мм был выполнен из стали 9Cr18, длина возвратно-поступательного движения составляла 5 мм, время скольжения – 2000 с. в разных средах: во влажном воздухе, деионизированной воде и растворе 3,5 мас.% NaCl, коэффициент трения записывался на компьютер напрямую с трибометра. 2D-бесконтактным оптическим профилометром (KLA-Tencor D-100, USA) исследовался объем износа и профиль поверхности. Методом КР исследованы спектры плёнок чистого DLC, Cr-DLC и Cr-H-DLC на кремниевой подложке. Спектры КР показывают увеличение доли связей sp^3 при возрастании приложенной нагрузки и позволяют судить о хорошей поверхностной адгезии при работе таких покрытий.

Испытаны покрытия DLC [26], работающие на керамических парах трения типа «шар-диск» с контртелом из Si_3N_4 , SiC, WC, ZrO_2 и SiO_2 при разных нагрузках (5, 10, 15 Н) и воздействиях различных внешних сред (например, деионизированной воды, метана), изучалась адгезия, морфология поверхности и пятна износа, проведены оценочные расчёты, получены изображения СЭМ и спектры КР. Найдено, что в присутствии метана 4–5% резко увеличивается коэффициент трения, несмотря на уменьшение размеров зёрен в DLC с небольшим количеством sp^2 связей, которые уменьшают адгезию между подложкой и покрытием. При увеличении концентрации метана (>5%) и увеличении времени испытаний адгезия снижается, а покрытие отваливается и увеличивается остаточный износ.

При наличии шлифовального мусора и воды вода образует плёнку, которая значительно уменьшает шероховатость поверхности покрытия DLC в процессе износа и минимизирует реальную площадь контакта пары трения, т.о. оказалось, что условия водной смазки приводят к снижению коэффициента трения: при сокращении интервала времени от обкатки до стабильного состояния коэффициент трения уменьшается до 0,065 в водной смазке по сравнению с сухим трением 0,107 [26].

Гидрогенизированные углеродные покрытия

Гидрогенизированный аморфный углерод ($a\text{-C:H}$) (на треугольнике составов, рис. 1), в отдельной литературе он также называется «DLC», есть аморфная сетка из атомов углерода и водорода. Эта сетка содержит сильно сшитые углеродные атомы преимущественно из графитоподобных sp^2 и алмазоподобных sp^3 связей [13].

В [27; 28] описана работа покрытий $a\text{-C:H}$. По описанию [27] покрытие нанесено на подложку элемента пары трения из стали марки 100Cr6 методом вакуумного осаждения. Сечение покрытий и морфология их поверхности исследовались методом СЭМ с микроанализатором EDS, а также после трибологических измерений на трибометре применялся конфокальный микроскоп с интерферометрией. В качестве СК использовались ионные жидкости IL1, масло ПАО-6, смазочно-охлаждающие эмульсии с цинковым аспаратом BCCS. Построены зависимости измеренных коэффициентов трения в различных смазочных средах в зависимости от линейного износа и длины скольжения. Наилучший коэффициент трения на протяжении цикла нагружения достигался при использовании в качестве СК ионных жидкостей, $f \sim 0,1$. Сухое трение дало худшие показатели, $f \sim 0,14$, при 400 м пробега контртела, а использование СК BCCS привело значение f к 0,14 на 1 км.

Схемы узлов трения скольжения с возвратно-поступательными механизмами рассмотрены в [28]. Исследовались плёнки толщиной 2 мкм при нагрузке 2 Н при комнатной температуре, относительной атмосферной влажности 50% и схеме трения «шар-диск». Результаты испытаний соотносятся с оценками морфологии поверхности: в начале цикла испытаний высокий коэффициент трения f на DLC-покрытиях отражает первоначальные условия контакта контртел, а при установившемся режиме f снижается, при этом в присутствии продуктов износа, площадь контакта увеличивается. Углеродные связи sp^2 способствуют повышению f и повреждению поверхности материала DLC по сравнению с алмазом в объёме. В [28] проведено сравнение с более низким f у покрытий $a\text{-C}$ и $ta\text{-C}$ по отношению к водородосодержащему покрытию $a\text{-C:H}$. Для изучения морфологии поверхности контакта для всех разновидностей углеродных покрытий применялись методы КР и атомно-силовой микроскопии. Получены зависимости значения f от числа циклов нагружения 0 ... 20 000: для $a\text{-C:H}$ $f \approx 0,15$ от 8000 цикла.

Вдобавок к сказанному в предыдущем разделе, в [25] исследовано влияние водорода на трибологические свойства при работе в составе покрытий Cr-H-DLC.

Заключение

В обзоре на основании анализа совокупности количественных характеристик, приведённых в литературных источниках, исследовано современное состояние актуальной проблемы физики конденсированного состояния – контакта взаимодействующих поверхностей различных

материалов. Установлено положительное назначение легирования углеродосодержащих покрытий, применяемых в триботехнических задачах: требуемое уменьшение коэффициента трения и износа. Оценены преимущества и недостатки покрытий с различными типами легирующих элементов (например, металлов IV-V группы, полупроводниковых элементов, водорода) в различных смазочных средах, парах трения и условиях работы.

Показано влияние упорядочения, морфологии частиц и их возможной агрегации за счёт углеродных связей sp^1 , sp^2 , sp^3 и их соотношений в покрытиях на коэффициент трения и другие трибологические показатели.

Статья поступила в редакцию

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленая трибология: ориентационные свойства углеродных алмазоподобных покрытий трибологических узлов в смазочных средах (обзор) / Левченко В. А., Буяновский И. А., Большаков А. Н., Матвеев В. Н. // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. № 12. С. 1499–1513. DOI: 10.1134/S0044461819120016.
2. Доценко А. И., Буяновский И. А. Основы триботехники: учебник. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 336 с.
3. Tribological and percolation properties of polypropylene/nanodiamond soot composites / Lebedev O. V., Bogdanova O. I., Goncharuk G. P., Ozerin A. N. // Polymers and Polymer Composites. 2020. Vol. 28. Iss. 6. P. 369–377. DOI: 10.1177/0967391119879280.
4. Dağidir K., Bilen K. Experimental investigation of usage of POE lubricants with Al₂O₃, graphene or CNT nanoparticles in a refrigeration compressor // Beilstein Journal of Nanotechnology. 2023. Vol. 14. P. 1041–1058. DOI: 10.3762/bjnano.14.86.
5. Buyanovskii I. A., Khrushchov M. M., Samusenko V. D. Tribological Behavior of Diamond-Like Carbon Coatings under Boundary Friction: Part I. Structure, Testing Methods, Lubrication by Adsorption Layers // Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 4. P. 893–906. DOI: 10.1134/S2075113322040086.
6. Evaluation of bias voltage effect on diamond-like carbon coating properties deposited on tungsten carbide cobalt / Zia A. W., Lee S., Kim J.-K., Kim T. G., Song J. L. // Surface and Interface Analysis. 2014. Vol. 46. Iss. 3. P. 152–156. DOI: 10.1002/sia.5400.
7. Tribological properties of thin films made by atomic layer deposition sliding against silicon / Kilpi L., Ylivaara O. M. E., Vaajoki A., Liu X., Rontu V., Sintonen S., Haimi E., Malm J., Bosund M., Tuominen M., Sajavaara T., Lipsanen H., Hannula S.-P., Puurunen R. L., Ronkainen H. // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2018. Vol. 36. P. 01A122-1–01A122-12. DOI: 10.1116/1.5003729.
8. Семенов А. П. Трибологические свойства и вакуумные ионно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 1. С. 83–102.
9. Grill A., Patel V. Tribological properties of diamond-like carbon and related materials // Diamond and Related Materials. 1993. Vol. 2. Iss. 5–7. P. 597–605. DOI: 10.1016/0925-9635(93)90190-D.
10. Moriguchi H., Ohara H., Tsujioka M. History and Applications of Diamond-Like Carbon Manufacturing Processes // SEI Technical Review. 2016. No. 82. P. 52–58.

11. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films – from first experiments to worldwide applications // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 242. P. 214–225. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.031.
12. Charitidis C. A., Koumoulos E. P., Dragatogiannis D. A. Nanotribological Behavior of Carbon Based Thin Films: Friction and Lubricity Mechanisms at the Nanoscale // *Lubricants*. 2013. Vol. 1 (2). P. 22–47. DOI: 10.3390/lubricants1020022.
13. Jacob W., Möller W. On the structure of thin hydrocarbon films // *Applied Physics Letters*. 1993. Vol. 63, Iss. 13. P. 1771–1773. DOI: 10.1063/1.110683.
14. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2002. Vol. 37, Iss. 4–6. P. 129–281. DOI: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0.
15. Буяновский И. А., Самусенко В. Д. Граничная смазка как защита трибосопряжения от износа и заедания при жестком режиме работы // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2019. Т. 20. № 8. С. 379–384.
16. Молибденсодержащее углеродное покрытие триботехнического назначения и антифрикционные свойства масел при граничной смазке / Буяновский И. А., Левченко В. А., Большаков А. Н., Самусенко В. Д. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2019. № 1. С. 86–91. DOI: 10.1134/S023571191901005X.
17. Роль углеродных покрытий-ориентантов в оптимизации смазочной способности граничных слоев / Левченко В. А., Буяновский И. А., Игнатьева З. Н., Матвеев В. Н. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2004. № 2. С. 43–48.
18. Углеродные покрытия-ориентанты, легированные некоторыми элементами VIB подгруппы Периодической системы, и их влияние на эффективность антифрикционных свойств масел / Буяновский И. А., Большаков А. Н., Левченко В. А., Матвеев В. Н. // *Механизация строительства*. 2017. Т. 78. № 6. С. 18–21.
19. Броневец М. А. Трибология и материалы для космической техники // *Трибология – Машиностроению: труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН (Москва, 19–21 ноября 2018 г.)* / под ред. И. А. Буяновского, М. В. Прожеги, В. Д. Самусенко. М.-Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. С. 87–89.
20. Илясов В. В., Ашканов А. В., Холодова О. М. К вопросу об износостойкости углеродных пленок // *Трибология – Машиностроению: труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН (Москва, 19–21 ноября 2018 г.)* / под ред. И. А. Буяновского, М. В. Прожеги, В. Д. Самусенко. М.-Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. С. 218–220.
21. Усиенов А., Гоголинский К. Механические свойства сверхтонких углеродных алмазоподобных покрытий // *Наноиндустрия*. 2010. № 5. С. 54–57.
22. Effect of diamond-like carbon coatings alloying with chromium and molybdenum on the lubricating properties of oils during friction in pair with steel / Buyanovskii I. A., Khrushchov M. M., Samusenko V. D., Atamanov M. V., Shcherbakov Yu. I. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2059: 28th International Conference on Vacuum Technique and Technology (VTT 2021). Article 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2059/1/012004.
23. Voevodin A. A., O'Neill J. P., Zabinski J. S. Nanocomposite tribological coatings for aerospace applications // *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol. 116–119. P. 36–45. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00228-5.

24. Hua Ch., Ying S. H., Qiu J. S. Ni-P-Diamond Composite Coating on Friction Shims // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 652–654. P. 1862–1865. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.1862.
25. Structure and Anticorrosion, Friction, and Wear Characteristics of Pure Diamond-Like Carbon (DLC), Cr-DLC, and Cr-H-DLC Films on AZ91D Mg Alloy / Cui X.-J., Ning Ch.-M., Shang L.-L., Zhang G.-A., Liu X.-Q. // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28. P. 1213–1225. DOI: 10.1007/s11665-019-3854-8.
26. Investigation of Friction and Wear Performance of Diamond Coating under Si₃N₄ Friction Pair / Lu F., Wang Y., Li H., Hao T., Fu Z., Yan G. // *Mechanika*. 2021. Vol. 27. No. 5. P. 421–428. DOI: 10.5755/j02.mech.28329.
27. The properties of lubricated friction pairs with diamond-like carbon coatings / Kowalczyk J., Milewski K., Madej M., Ozimina D. // *Open Engineering*. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 688–698. DOI: 10.1515/eng-2020-0075.
28. Tribological behaviour of different diamond-like carbon materials / Liu E., Blanpain B., Shi X., Celis J.-P., Tan H.-S., Tay B.-K., Cheah L.-K., Roos J. R. // *Surface and Coatings Technology*. 1998. Vol. 106. Iss. 1. P. 72–80. DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00494-0.

REFERENCES

1. Levchenko V. A., Buyanovsky I. A., Bolshakov A. N., Matveenkov V. N. [Green tribology: orientation properties of diamond-like carbon coatings of friction units in lubricating media]. In: *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2019, vol. 92, iss. 12, pp. 1499–1513. DOI: 10.1134/S0044461819120016.
2. Dotsenko A. I., Buyanovsky I. A. *Osnovy tribotekhniki* [Basics of tribotechnics]. Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 336 p.
3. Lebedev O. V., Bogdanova O. I., Goncharuk G. P., Ozerin A. N. Tribological and percolation properties of polypropylene/nanodiamond soot composites. In: *Polymers and Polymer Composites*, 2020, vol. 28, iss. 6, pp. 369–377. DOI: 10.1177/0967391119879280.
4. Dağdır K., Bilen K. Experimental investigation of usage of POE lubricants with Al₂O₃, graphene or CNT nanoparticles in a refrigeration compressor. In: *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2023, vol. 14, pp. 1041–1058. DOI: 10.3762/bjnano.14.86.
5. Buyanovskii I. A., Khrushchov M. M., Samusenkov V. D. Tribological Behavior of Diamond-Like Carbon Coatings under Boundary Friction: Part I. Structure, Testing Methods, Lubrication by Adsorption Layers. In: *Inorganic Materials: Applied Research*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 893–906. DOI: 10.1134/S2075113322040086.
6. Zia A. W., Lee S., Kim J.-K., Kim T. G., Song J. L. Evaluation of bias voltage effect on diamond-like carbon coating properties deposited on tungsten carbide cobalt. In: *Surface and Interface Analysis*, 2014, vol. 46, iss. 3, pp. 152–156. DOI: 10.1002/sia.5400.
7. Kilpi L., Ylivaara O. M. E., Vaajoki A., Liu X., Rontu V., Sintonen S., Haimi E., Malm J., Bosund M., Tuominen M., Sajavaara T., Lipsanen H., Hannula S.-P., Puurunen R. L., Ronkainen H. Tribological properties of thin films made by atomic layer deposition sliding against silicon. In: *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2018, vol. 36, pp. 01A122-1–01A122-12. DOI: 10.1116/1.5003729.
8. Semenov A. P. [Tribological properties and vacuum ion-plasma methods of application of diamond and diamond-like coatings]. In: *Treniye i iznos* [Journal of Friction and Wear], 2009, vol. 30, iss 1, pp. 83–102.
9. Grill A., Patel V. Tribological properties of diamond-like carbon and related materials. In: *Diamond and Related Materials*, 1993, vol. 2, iss. 5–7, pp. 597–605. DOI: 10.1016/0925-9635(93)90190-D.

10. Moriguchi H., Ohara H., Tsujioka M. History and Applications of Diamond-Like Carbon Manufacturing Processes. In: *SEI Technical Review*, 2016, no. 82, pp. 52–58.
11. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films – from first experiments to worldwide applications. In: *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 242, pp. 214–225. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.031.
12. Charitidis C. A., Koumoulos E. P., Dragatogiannis D. A. Nanotribological Behavior of Carbon Based Thin Films: Friction and Lubricity Mechanisms at the Nanoscale. In: *Lubricants*, 2013, vol. 1 (2), pp. 22–47. DOI: 10.3390/lubricants1020022.
13. Jacob W., Möller W. On the structure of thin hydrocarbon films. In: *Applied Physics Letters*, 1993, vol. 63, iss. 13, pp. 1771–1773. DOI: 10.1063/1.110683.
14. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. In: *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2002, vol. 37, iss. 4–6, pp. 129–281. DOI: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0.
15. Buyanovskii I. A., Samusenko V. D. [Boundary lubrication as protection for tribocoupling against wear and scuffing at hard work]. In: *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii* [Assembling in mechanical engineering and instrument-making], 2019, vol. 20, no. 8, pp. 379–384.
16. Buyanovskii I. A., Levchenko V. A., Bolshakov A. N., Samusenko V. D. [A molybdenum-containing carbon coating for tribotechnical use and antifriction properties of oils under boundary lubrication]. In: *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2019, no. 1, pp. 86–91. DOI: 10.1134/S023571191901005X.
17. Levchenko V. A., Buyanovsky I. A., Ignatyeva Z. N., Matveenkov V. N. [The role of carbon coatings-orientants in optimizing the lubricating ability of boundary layers]. In: *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2004, no. 2, pp. 43–48.
18. Buyanovsky I. A., Bolshakov A. N., Levchenko V. A., Matveenkov V. N. [Carbon coating-orienters, doped with some elements of VIB subgroup of the periodic system, and their impact on the effectiveness of the antifriction properties of oils]. In: *Mekhanizatsiya stroitelstva* [Mechanization of construction], 2017, vol. 78, no. 6, pp. 18–21.
19. Bronovets M. A. [Tribology and materials for space technology]. In: *Tribologiya – Mashinostroyeniye: trudy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu IMASH RAN (Moskva, 19–21 noyabrya 2018 g.)* [Tribology for Mechanical Engineering: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference dedicated to the 80th Anniversary of Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, November 19–21, 2018)]. Moscow, Izhevsk, Izhevsk Institute of Computer Research Publ., 2018, pp. 87–89.
20. Ilyasov V. V., Ashkanov A. V., Kholodova O. M. [On the wear resistance of carbon films]. In: *Tribologiya – Mashinostroyeniye: trudy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu IMASH RAN (Moskva, 19–21 noyabrya 2018 g.)* [Tribology for Mechanical Engineering: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference dedicated to the 80th Anniversary of Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, November 19–21, 2018)]. Moscow, Izhevsk, Izhevsk Institute of Computer Research Publ., 2018, pp. 218–220.
21. Usienov A., Gogolinsky K. [Mechanical properties of superfine carbon diamondlike coatings]. In: *Nanoidustriya* [Nanoindustry], 2010, no. 5, pp. 54–57.
22. Buyanovskii I. A., Khrushchov M. M., Samusenko V. D., Atamanov M. V., Shcherbakov Yu. I. [Effect of diamond-like carbon coatings alloying with chromium and molybdenum on the lubricating properties of oils during friction in pair with steel]. In:

- Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2059: 28th International Conference on Vacuum Technique and Technology (VTT 2021), article 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2059/1/012004.
23. Voevodin A. A., O'Neill J. P., Zabinski J. S. Nanocomposite tribological coatings for aerospace applications. In: *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 116–119, pp. 36–45. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00228-5.
24. Hua Ch., Ying S. H., Qiu J. S. Ni-P-Diamond Composite Coating on Friction Shims. In: *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 652–654, pp. 1862–1865. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.1862.
25. Cui X.-J., Ning Ch.-M., Shang L.-L., Zhang G.-A., Liu X.-Q. Structure and Anticorrosion, Friction, and Wear Characteristics of Pure Diamond-Like Carbon (DLC), Cr-DLC, and Cr-H-DLC Films on AZ91D Mg Alloy. In: *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, vol. 28, pp. 1213–1225. DOI: 10.1007/s11665-019-3854-8.
26. Lu F., Wang Y., Li H., Hao T., Fu Z., Yan G. Investigation of Friction and Wear Performance of Diamond Coating under Si3N4 Friction Pair. In: *Mechanika*, 2021, vol. 27, no. 5, pp. 421–428. DOI: 10.5755/j02.mech.28329.
27. Kowalczyk J., Milewski K., Madej M., Ozimina D. The properties of lubricated friction pairs with diamond-like carbon coatings. In: *Open Engineering*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 688–698. DOI: 10.1515/eng-2020-0075.
28. Liu E., Blanpain B., Shi X., Celis J.-P., Tan H.-S., Tay B.-K., Cheah L.-K., Roos J. R. Tribological behaviour of different diamond-like carbon materials. In: *Surface and Coatings Technology*, 1998, vol. 106, iss. 1, pp. 72–80. DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00494-0.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ельникова Лилия Вячеславовна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий Юго-Западного государственного университета;
e-mail: elnikova@itep.ru

Кузьменко Александр Павлович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий Юго-Западного государственного университета;
e-mail: apk3527@mail.ru

Беляев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник управления развития науки, профессор кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения; профессор кафедры нанотехнологии и микросистемной техники Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru, vv.belyaev@guppros.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Liliia V. Elnikova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Researcher, National Research Center “Kurchatov institute”; Senior Researcher, Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University;
e-mail: elnikova@itep.ru

Aleksandr P. Kuzmenko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Leading Researcher, Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University;
e-mail: apk3527@mail.ru

Victor V. Belyaev – Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Science Development Department; Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education; Prof., Department of Nanotechnologies and Microsystem Technology, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba;
e-mail: vic_belyaev@mail.ru, vv.belyaev@guppros.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Ельникова Л. В., Кузьменко А. П., Беляев В. В. Эффекты упорядочения в антифрикционных материалах с углеродосодержащими покрытиями (обзор) // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2024. № 2. С. 45–59.

DOI: 10.18384/2310-7251-2024-2-45-59

FOR CITATION

Elnikova L. V., Kuzmenko A. P., Belyaev V. V. Ordering effects in lubricant media in the presence of carbon-containing coatings (a review). In: *Bulletin of Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2024, no. 2, pp. 45–59.

DOI: 10.18384/2310-7251-2024-2-45-59