

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №4 (130). С. 41-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №4 (130). P. 41-48.

Научная статья
УДК 621.891:539.2
doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-41-48

Исследование структуры, состава и трибологических характеристик наноструктурных монокристаллических покрытий, полученных ионно-плазменным методом

Илья Александрович Буяновский¹, Д.Т.Н., Владимир Анатольевич Левченко², к.ф.-м.н.,
Владимир Дмитриевич Самусенко³, к.т.н.

^{1,3} Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия,
² Институт перспективных покрытий и материалов университета Тайчжоу, г. Тайчжоу, Китай
¹ buyan37@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-5095>,
² vladlev@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-4443-7813>,
³ samusenkovd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8093-5372>

Аннотация. Рассмотрены технологии синтеза и механизмы действия наноструктурных монокристаллических покрытий с использованием ионно-плазменных методов. Такое покрытие образует на рабочих поверхностях тяжело нагруженных узлов трения прочный граничный слой, обеспечивающий смазочному материалу высокие антифрикционные свойства при трении в режиме граничной смазки.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, монокристаллический углерод, аморфный углерод, гибридизация углеродных связей, машина трения, трибологические свойства, граничная смазка

Благодарности: Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. М.М. Хрущову за помощь в получении на микроскопе Neofot-32 3D изображений дорожек износа АПП с монокристаллической и аморфной структурами.

Для цитирования: Буяновский И.А., Левченко В.А., Самусенко В.Д. Исследование структуры, состава и трибологических характеристик наноструктурных монокристаллических покрытий, полученных ионно-плазменным методом // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №4 (130). – С. 41-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-41-48.

Original article

Investigation of the structure, composition and tribological characteristics of nanostructured monocrystalline coatings obtained by ion plasma technology

Ilya A. Buyanovskii¹, Dr. Sc. Tech., Vladimir A. Levchenko², Cand. Sc. Physics and Maths,
Vladimir D. Samusenko³, Cand. Sc. Tech.

^{1,3} A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
² Institute of Advanced Coatings and Materials of Taizhou University, Taizhou, China
¹ buyan37@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-5095>,
² vladlev@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-4443-7813>,
³ samusenkovd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8093-5372>

Abstract. Synthesis technologies and mechanisms of action of nanostructured monocrystalline coatings using ion-plasma technologies have been viewed. This coating builds up a strong boundary layer on working surfaces of heavily loaded friction units, which provides the lubricant with high antifriction properties generated by triboprocess in boundary lubrication mode.

Keywords: antifriction coating, monocrystalline carbon, amorphous carbon, hybridization of carbon bonds, friction machine, tribological properties, boundary lubrication

Acknowledgements: the authors are grateful to M.M. Khrushchev, Cand. Sc. Physics and Maths, for his assistance in obtaining 3D images of wear tracks APP with nanocrystalline and amorphous structures on the Neofot 32 microscope.

For citation: Buyanovskii I.A., Levchenko V.A., Samusenko V.D. Investigation of the structure, composition and tribological characteristics of nanostructured monocrystalline coatings obtained by ion plasma technology/ Science intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.4 (130), pp. 41-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-41-48.

Введение

К настоящему времени установлено, что алмазоподобные покрытия (АПП) характеризуются комплексом таких важнейших характеристик, как твёрдость, модуль упругости, износостойкость, низкий коэффициент трения и химическая инертность, какими не обладают другие известные твёрдые покрытия [1 – 3]. В настоящее время АПП успешно используются в микроэлектромеханических системах (МЭМС), в металлообрабатывающей промышленности (покрытие режущего инструмента), в биомедицинской индустрии, ответственных узлах трения машин и механизмов различных отраслей техники, функционирующих в достаточно широком интервале условий нагружения [3, 4]. При этом основные физико-механические и трибологические характеристики АПП можно варьировать, путём направленного выбора технологии их нанесения или легирования различными элементами.

Широкий спектр структур этих покрытий обусловлен способностью Sp^3 -, Sp^2 - и Sp^1 -гибридизованных состояний внешних электронов атомов углерода, составляющих эти покрытия, образовывать различные типы ковалентных связей и политипных кристаллических структур. Таким образом суммарный трибологический эффект от АПП покрытия зависит от сочетания этих фаз: объёмной (алмазной) Sp^3 -фазы; графитоподобной Sp^2 -фазы и линейной Sp^1 -фазы (карбин).

На практике наиболее широко применяются аморфные АПП, включающие Sp^2 и Sp^3 -фазы [4]. За последние годы было установлено, что покрытие монокристаллическим углеродом (МКУ), представляющим собой смесь кластеров Sp^1 и Sp^3 , обладает свойствами ориентанта и обеспечивает образование прочного граничного слоя в контакте трущихся тел даже в неактивной смазочной среде, что приводит к повышению антифрикционных и противозносных свойств этих сред без применения дополнительной активации в виде присадок различного механизма действия [5, 6].

Именно поэтому изучение трибологического поведения АПП в режиме граничной смазки, при котором основную роль играет уровень взаимодействия смазочной среды с поверхностными слоями трущихся тел, представляет особый интерес. В связи с этим в предлагаемой работе на базе эксперимен-

тальных результатов, полученных нами, а также данных, приведённых в технической литературе, проводится сравнение трибологического поведения пар трения сталь – АПП двух типов: аморфного углерода, практически не оказывающего заметного влияния на образование граничного слоя, и монокристаллического углерода, обеспечивающего образование высоко ориентированного граничного слоя.

Целью статьи является сравнение механизма изнашивания стальных образцов с покрытиями аморфным и монокристаллическим алмазоподобным углеродом, путём исследования механизма разрушения этих покрытий при трении в режиме граничной смазки.

Материалы и методы исследования

Технология напыления АПП на исследуемые образцы. Исследуемые покрытия наносилились на рабочие поверхности стальных образцов, представляющих собой диски диаметром 60 мм и толщиной 5 мм. Диски изготовлены из стали ШХ-15, закалённой и отпущенной до твёрдости 780 HV. Перед напылением сравниваемых покрытий рабочие поверхности дисков шлифовали и полировали до обеспечения величины параметра Ra шероховатости 0,05...0,07 мкм.

Для напыления исследуемых покрытий на рабочие поверхности образцов-дисков в данном исследовании использовалась ионно-плазменная технология синтеза [7]. Такая технология позволяет, варьируя её параметры (например, энергию ионов аргона и т.д.), контролировать долю атомов с различным типом гибридизации углеродных связей и, соответственно, фазовый состав покрытий, влияя на его конечные функциональные, в том числе трибологические свойства. Так, при облучении растущей пленки медленными ионами аргона определенной энергии на ее поверхности формируются слои ориентированных цепочек sp^1 -углерода.

Таким образом, на рабочие поверхности образцов-дисков алмазоподобные плёнки монокристаллического углерода напыляли методом импульсно-плазменного ионно-стимулированного осаждения углерода с использованием источника плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита. Цилиндрический катод источника углеродной плазмы был изготовлен из высокочистого

графита марки МПГ (99,99 %) с плотностью $2,5 \text{ г/см}^3$. Диаметр катода составлял 30 мм.

Установка для напыления представляла собой вакуумную систему, обеспечивающую импульсное осаждение углерода из плазменных сгустков с плотностью ионов $10^{13} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и степенью ионизации 95 %. Частота импульсов варьировалась в пределах $1 \dots 30 \text{ Гц}$, длительность импульса 100 мкс. Рост углеродного покрытия стимулировался дополнительным облучением ионами Ag^+ . Ионный пучок формировался ионным источником низкого давления. Энергия ионов Ag^+ , облучающих поверхность растущей пленки, варьировалась в пределах $0 \dots 300 \text{ эВ}$ и зависела как от напряжения экстракции, так и от параметров углеродной плазмы. В текущих рабочих экспериментах энергия была равна 150 эВ. Рабочее давление в вакуумной камере было 10^{-4} Па . Все напыляемые образцы перед нанесением покрытий подвергались ионно-лучевой обработке ионами инертного газа Ar^+ при давлении 10^{-2} Па и напряжении разряда ионного источника 3 кВ.

Для синтеза традиционных алмазоподобных покрытий с аморфной структурой был также использован импульсный ионно-плазменный метод получения алмазоподобных пленок с частотой $1 \dots 80 \text{ кГц}$. При проведении синтеза АПП покрытий с аморфной структурой использовалась графитовая мишень с чистотой 99,99 % и диаметром 10 см. Перед нанесением покрытий вакуумную камеру откачивали до давления $2 \times 10^{-4} \text{ Па}$ и затем проводили очистку поверхности образцов ионами аргона с использованием газового ионного источника при следующих режимах: напряжение разряда 3 кВ; ток разряда 100 мА; давление аргона 0,6 Па; отрицательное напряжение смещения на подложке 1 кВ и время очистки 8 мин. После очистки поверхности образцов проводился процесс синтеза АПП с аморфной структурой в атмосфере аргона при давлении

в камере $9 \times 10^{-3} \text{ Па}$; мощности разряда $4 \dots 6 \text{ кВт}$ и длительности импульса $1 \dots 2 \text{ мс}$. Степень ионизации углеродной плазмы составляла 100 %.

Проверка адекватности получения по приведённым выше методикам монокристаллического и аморфного покрытий. Проверка включала тесты на ориентирующую способность сравниваемых образцов, на различие Рамановских, а также РФЭС спектров на типы и количества связей углерода в этих образцах.

Оценка ориентирующих свойств сравниваемых покрытий была проведена в результате анализа дифракционных картин, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии. Как видно из рис. 1, а покрытие обладает свойствами ориентанта, так как имеет высокий уровень ориентации элементов поверхностного слоя (6 чётко различимых рефлексов), в то время как покрытие на рис. 1, б аморфное, т.е. такими свойствами не обладает.

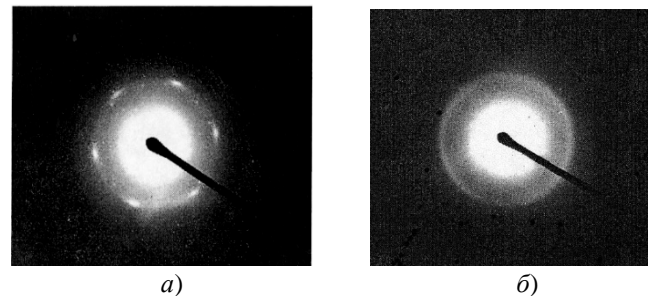


Рис. 1. Картины сравнительной электронной дифракции для монокристаллического (а) и аморфного (б) углеродных покрытий

Обобщённые результаты исследований с использованием Рамановской спектроскопии, осажденного на поверхность кремния углеродного материала, показало, что полученный спектр (рис. 2, а) имеет первый узкий максимум при 982 см^{-1} и второй широкий максимум при 1571 см^{-1} , что соответствует Sp^2 - Sp^3 гибридизации.

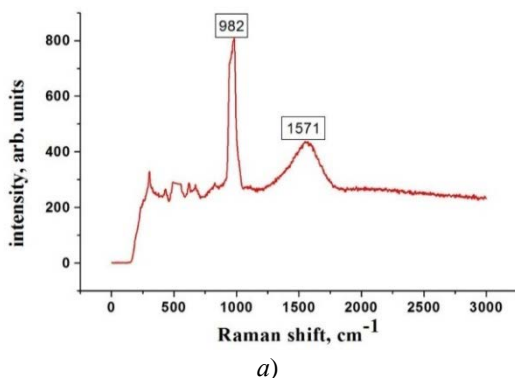
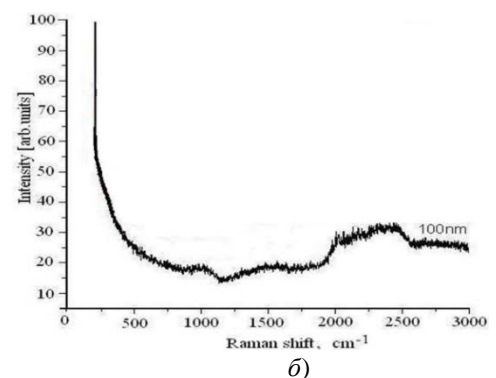


Рис. 2. Спектрограмма АПП:

а – с аморфной структурой; б – с монокристаллической структурой



Основными особенностями в этих спектрах являются узкий пик на частоте 982 см^{-1} , связанный с нанокристаллическим алмазом, и широкий пик около 1571 см^{-1} , соответствующий аморфному графиту. На рис. 3, б представлен КР-спектр углеродного АПП покрытия при длине волны лазерного возбуждения: $\lambda = 632,8\text{ нм}$. В тонком (толщиной 100 нм) АПП покрытии имеется только один широкий

максимум в КР-спектре между 2000 и 2500 см^{-1} . Эта высокочастотная зона соответствует валентным колебаниям линейным цепочкам углерода с монокристаллической структурой.

Оценка содержания типов и количества связей углерода в сравниваемых покрытиях была проведена путём обработки РФЭС спектров соответственно монокристаллического и аморфного углерода (табл. 1).

1. Типы и относительное количество связей углерода в образцах углерода

Материал покрытия	Тип связи элемента	C-Sp ¹	C-Sp ²	C-Sp ³	C-O
Монокристаллический углерод	Энергия связи, эВ	283,8	0	286,7	289,7
	Концентрация, %	20,7	0	50,1	29,0
Аморфный углерод	Энергия связи, эВ	0	284,5	285,8	286,9
	Концентрация, %	0	26,8	46,2	26,9

Таки образом, экспериментальная проверка показала, что по всем показателям – по ориентационной способности, по Рамановским спектрам и по типам и количествам связей углерода по описанным методам были получены соответственно монокристаллический и аморфный углерод.

Установка и метод испытания антифрикционных свойств АПП в режиме граничной смазки. Для оценки антифрикционных характеристик смазочных материалов при трении стального шара по диску с покрытием двух сравниваемых АПП при граничной смазке был использован температурный метод оценки смазочных свойств масел, разработанный Р.М. Матвеевским и его учениками [8]. Основой этого метода является представление о том, что параметром, определяющим трибологические характеристики смазанного трибосопряжения, является суммарная температура в зоне фрикционного контакта независимо от того, что является её источником – фрикционный нагрев, нагрев от внешнего источника тепла или суммарный нагрев от обоих этих источников тепла.

Реализация этого метода позволяет проводить трибологические испытания при незначительной скорости перемещения трущихся тел, минимизируя тем самым их фрикционный нагрев, задавая температуру испытаний от внешнего источника объёмного нагрева образцов и окружающего их слоя масла, которую можно задавать со значительной точностью.

В представленной работе температурный метод оценки смазочной способности масел реализуется на лабораторной установке ДС-3, узел трения которой приведён на рис. 3.

Функционирует установка следующим образом. На вертикальном валу (на рисунке не показан) установлена масляная чаша б, на дне которой расположен жёстко связанный с ней

образец-диск 2, вращающийся вместе с ней. Под действием груза 1 к исследуемой поверхности этого диска через рычаг 9 и оправку 5 зажатый в ней шарик прижимается к вращающемуся под действием привода вертикального вала к образцу-диску, на рабочей стороне которого наносят исследуемые покрытия. Сила трения шара по диску определяется с помощью динамометрического устройства 8. Машина трения работает в достаточно широком интервале температур ($20\dots 250\text{ }^\circ\text{C}$), которые обеспечивает электронагреватель 4, управляемый специальным задатчиком, который обеспечивает требуемую скорость нагрева и, в случае необходимости, поддержание объёмной температуры на требуемом уровне. Датчиком температуры при этом служит термопара 7, спай которой помещён в масло на 3 мм ниже его уровня.



Рис. 3. Машина трения ДС-3:

1 – груз; 2 – образец – диск; 3 – арретир; 4 – корпус электронагревателя; 5 – оправка с закреплённым в ней контрообразцом – шариком; 6 – масляная чаша; 7 – термопара; 8 – динамометрическое устройство; 9 – рычаг

Ниже будут рассмотрены две методики испытаний при трении стандартного шарика из стали ШХ-15 по образцам дисков из стали ШХ-15 с покрытиями монокристаллическим углеродом, аморфным углеродом и без покрытия в среде вазелинового медицинского масла, а также для сравнения – вазелинового масла с присадкой 1 % олеиновой кислоты. Первая серия включала проведение испытаний при постоянной скорости скольжения диска 0,2 мм/с, нагрузке на узел трения 9 Н и скорости повышения температуры узла трения от нагревателя 10 °С/мин в интервале температур 20...200 °С.

Вторая серия включала проведение испытаний с теми же скоростью и нагрузкой, но только при температурах 50, 100 и 200 °С, после чего на оптическом микроскопе Neofot-32 с использованием компьютерной системы обработки и моделирования оптических изображений были проведены исследования морфологии дорожек износа, образовавшихся на сравниваемых дисковых образцах. Система включала видеокамеру, установленную на окуляр микроскопа, систему трансляции изображения на компьютер и пакет программного обеспечения Image Expert 3, которая позволила создавать реконструированные трёхмерные 3D изображения поверхностей дорожек износа путём варьирования величин углов по трём осям x , y , z . Это дало возможность проанализировать эволюции дорожек трения с увеличением температур применительно к сравниваемым монокристаллической и аморфной структурам покрытий и сформулировать некоторые соображения о механизмах разрушения алмазоподобных покрытий при трении в режиме граничной смазки [9].

Результаты исследования

Как уже было отмечено выше, данное исследование включает трибологический эксперимент, в котором сравнивается влияние монокристаллического и аморфного алмазоподобного углеродов на смазочные свойства ин-активного вакуумным маслом ВМ-1 при трении по стали в режиме граничной смазки, а также оптическое исследование дорожек износа после трибологических испытаний этих покрытий.

Трибологический эксперимент производился температурным методом на машине ДС-3, приведённой на рис. 3. Образцами служили диски из стали ШХ-15, на рабочих поверхностях которых по описанным выше методикам напылялись сравниваемые покрытия – монокристаллическое и аморфное. Контроль образцами

служили стандартные шары из той же стали. Испытания проводили при описанных выше режимах. В первой серии испытаний одновременно включались: двигатель установки, обеспечивающий вращение предварительно нагруженного испытательного диска с линейной скоростью 0,2 мм/с по диаметру 50 мм, и нагреватель повышал температуру зоны трения, и окружающего его слоя масла со скоростью 10 °С/мин. Дополнительно в тех же условиях и в том же масле испытывалась пара трения сталь по стали. Эта же пара трения испытывалась при смазке тем же вакуумным маслом, но с присадкой 1 % масс. олеиновой кислоты.

Результаты испытаний приведены на рис. 4 в виде зависимости коэффициентов трения от температуры нагрева [10, 11].

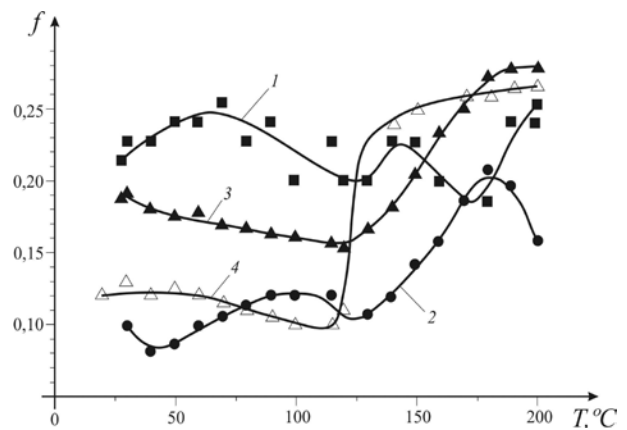
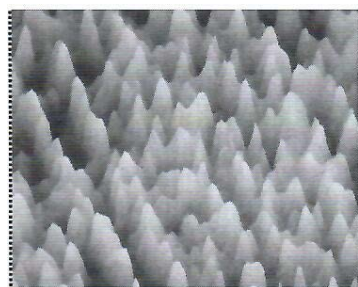


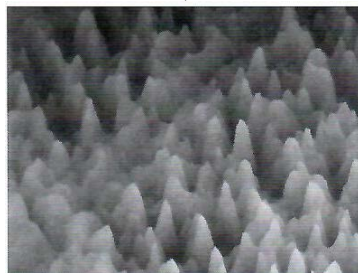
Рис. 4. Зависимость коэффициента трения f от температуры T испытаний при смазывании вакуумным маслом ВМ-1 для пар трения: 1 – сталь ШХ-15 по аморфному алмазоподобному покрытию; 2 – сталь ШХ-15 по МКУ покрытию; 3 – сталь ШХ-15 по стали ШХ-15 без покрытия; 4 – сталь ШХ-15 по стали ШХ-15 при смазывании вакуумным маслом ВМ-1+1% олеиновой кислоты

Как видно из рис. 4, самое высокое трение при температурах от 20 до 120 °С наблюдалось при испытании стали по аморфному покрытию со смазкой маслом ВМ-1 (кривая 1). С повышением температуры коэффициент трения снижался (по-видимому, из-за приработки трущихся тел). При трении стали по монокристаллическому покрытию в той же среде коэффициенты трения резко снижаются: до 0,08...0,12 при нагреве от 20 до 125 °С. Дальнейший нагрев приводит к повышению коэффициента трения до 0,2 при 180 °С (кривая 2). Промежуточные результаты были получены для трения стали по стали в той же среде (кривая 3). Особый интерес вызывает кривая 4 – та же пара трения, но в масле ВМ-1

добавлена олеиновая кислота, оказывающая заметное антифрикционное действие. В этом случае коэффициент трения при нагреве до 120 °С достаточно низок, но при превышении этой температуры резко возрастает до 0,25. Таким образом, трение стали по монокристаллическому покрытию в инактивной среде обеспечивает лучший антифрикционный эффект, чем трение стали по стали в поверхностно-активной среде раствора олеиновой кислоты в этом масле.



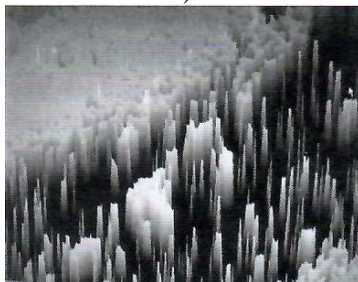
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Реконструированные 3D изображения дорожек износа образца с покрытием монокристаллическим углеродом:

а – исходная поверхность образца; б, в, г – изображения после испытания соответственно при 50, 100 и 200 °С. Для рис. 5, а и 5, б увеличение $\times 300$, углы наклона $x = 350^\circ$, $y = 10^\circ$, $z = 5^\circ$; для рис. 5, в и 5, г увеличение $\times 200$, углы наклона $x = 350^\circ$, $y = 0^\circ$, $z = 10^\circ$

Вторая серия испытаний применительно к покрытиям как монокристаллическим, так и аморфным углеродом включала получение дорожек износа при соответственно 50, 100 и 200 °С, микрофотографирование участков этих дорожек износа и реконструирование их для получения соответствующих трёхмерных изображений. Эти изображения приведены на рис. 5 и рис. 6.

Каждый из этих рисунков включает изображение исходной поверхности диска до начала процесса изнашивания, а затем – изображения изношенных поверхностей при указанных трёх температурах. Для каждого изображения ниже приводятся значения углов по осям x , y , z , на которые они повернуты для получения 3D изображений, и увеличение.

Таким образом, экспериментально установлено, что МКУ покрытие стальных деталей обеспечивает заметно более высокие антифрикционные характеристики смазочным материалам, чем сталь без покрытия и чем аморфное покрытие (см. рис. 5).

Исследование влияния температуры на эволюцию дорожек износа на сравниваемых покрытиях также показали заметное различие полученных результатов (см. рис. 6). Так, при температуре 50 °С на МКУ покрытии наблюдается незначительный приработочный износ по вершинам неровностей (см. рис. 6, б), а при дальнейшем повышении температуры, поверхности заметно выглаживаются (см. рис. 6, в), но при максимальной температуре испытаний особенно чётко выявляется столбчатая структура покрытия, особенно заметная вследствие имеющего место при этой температуре выламывания значительной части столбчатых кристаллитов на дорожке износа (см. рис. 6, г).

В то же время, на реконструируемом 3D изображении дорожек износа аморфного покрытия заметно, что при всех трёх исследуемых температурах наблюдается существенно большая шероховатость, возрастающая с ростом температур, причём при температурах 100 °С и выше на поверхности этой дорожки наблюдаются следы вырывов и переноса материала. При этом столбчатые кристаллиты имеют более сглаженную форму, а отдельные кристаллиты объединены в конгломераты, которые, по-видимому, выламываются, что и приводит к разрушению покрытия.

Обсуждение результатов

Проведённые эксперименты показали, что МКУ покрытие заметно повышает антифрикционные свойства смазочных сред, превосходя результаты, полученные при испытании

покрытий аморфного углерода. Основная причина различия результатов этих процессов в принципе не вызывает сомнений: как уже было упомянуто выше, углеродное алмазоподобное покрытие-ориентант, имеющую монокристаллическую структуру, воспроизводит на поверхности трения высокоупорядоченный

гомеотропно-ориентированный граничный слой из молекул смазочной среды, который защищает эти поверхности от повышенного износа и заедания и обеспечивает значительное снижение коэффициентов трения. Алмазоподобное покрытие, имеющее аморфную структуру, такими свойствами не обладает.

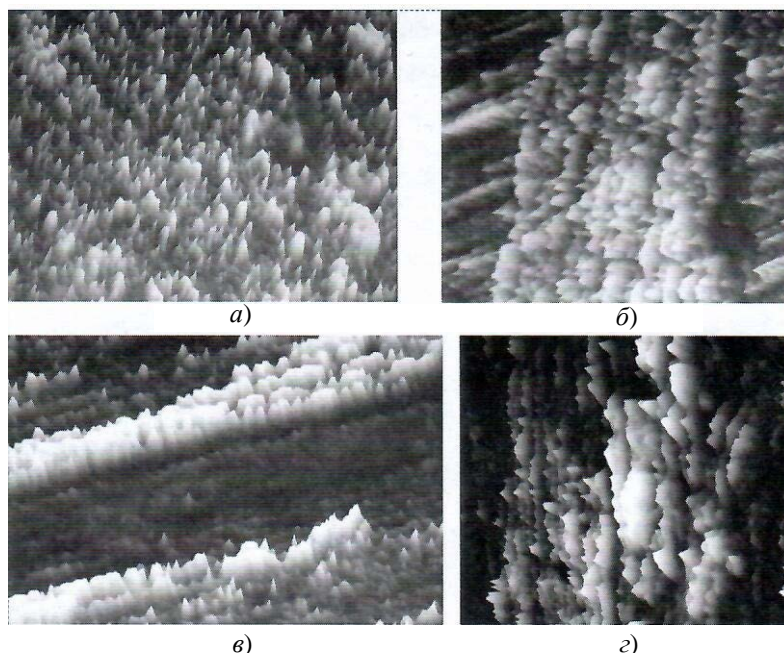


Рис. 6. Реконструированные 3D изображения дорожек износа образца с покрытием аморфным углеродом: *a* – исходная поверхность образца; *б*, *в*, *г* – изображения после испытания соответственно при 50, 100 и 200 °С. Для рис. 6, *a* – *в* увеличение $\times 200$; для рис. 6, *г* увеличение $\times 400$. Для всех рисунков углы наклона $x = 15^\circ$, $y = 5^\circ$, $z = 0$

Сравнительное исследование морфологии поверхностей износа пар трения сталь – МКУ-покрытие и сталь – аморфное углеродное покрытие, представленное в предлагаемой работе, позволяет раскрыть некоторые аспекты механизмов трибологических процессов при функционировании этих пар трения при граничной смазке. Так, механизм разрушения аморфных покрытий в зоне дорожек износа включает как изнашивание по вершинам столбчатых кристаллитов (см. рис. 5 и рис. 6), так и выламывание отдельных кристаллитов и их конгломератов. Это может привести к нарушению сплошности покрытий и в дальнейшем к росту площадей металлического контакта, схватыванию и переносу материалов контактирующих тел. Нарушение сплошности монокристаллических алмазоподобных покрытий, по-видимому, происходит вследствие выламывания отдельных столбчатых кристаллитов, следствием чего появляются микрорезервуары, которые заполняются смазочным материалом, задерживаемым таким образом в зоне трения.

Значительное нарушение сплошности покрытий при высоких температурах приводит к

реализации металлического контакта трущихся тел, их схватыванию на этих участках, вырывам и необратимой порче поверхностей контактирующих деталей.

Заключение

Анализ совокупности приведённых в предлагаемой статье результатов экспериментальных исследований трибологического поведения МКУ и аморфных алмазоподобных покрытий при трении показал непротиворечивость этих результатов. И по антифрикционным характеристикам, и по противоизносным свойствам, и по уровню шероховатости поверхностей, полученному в процессе трения по стали лучшие показатели получены при исследовании МКУ покрытия. Это подтверждают полученные ранее результаты авторов, показавшие высокую эффективность применения МКУ в качестве покрытий стальных деталей в ответственных узлах трения, работающих в режиме граничной смазки, и раскрывает некоторые аспекты механизмов разрушения углеродных покрытий при трении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Erdemir, A., Donnet, C. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects //Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, T. 39, № 18, С. R311.
2. Velkavrh, I., Kalin, M., Vizintin, J. The performance and mechanisms of DLC-coated surfaces in contact with steel in boundary-lubrication conditions: a review //Strojniški vestnik, 2008, T. 54, № 3, С. 189-206.
3. Bewilogua, K., Hofmann, D. History of diamond-like carbon films-from first experiments to worldwide applications // Surface and Coatings Technology, 2014, T. 242, С. 214-225.
4. A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications / A. Tyagi et al. //International journal of refractory metals and hard materials, 2019, T. 78, С. 107-122.
5. Oriented carbyne layers / Y. P. Kudryavtsev et al. // Carbon, 1992, T. 30, № 2, С. 213-221.
6. Роль углеродных покрытий-ориентантов в оптимизации смазочной способности граничных слоев / В.А. Левченко и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 2. – С. 43-48.
7. Семенов, А.П. Трибологические свойства и вакуумно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. – 2009. – Т. 30. – № 1. – С. 83-102.
8. Буяновский, И.А., Лашхи, В.Л., Самусенко, В.Д. Развитие температурного метода оценки смазочной способности масел // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2017. – № 2. – С. 28-33.
9. Исследование специфики разрушения алмазоподобных покрытий при трении / И.А. Буяновский и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 7. – С. 44-47.
10. Углеродные покрытия-ориентанты и эффективность смазочного действия масел / И.А. Буяновский и др. // Механизация строительства. – 2013. – № 6. – С. 41-44.
11. Левченко, В.А., Буяновский, И.А., Самусенко, В.Н. Исследование алмазоподобного монокристаллического углерода для триботехнического применения // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 6. – С. 725-732.

REFERENCES

1. Erdemir, A., Donnet, C. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects //Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, T. 39, № 18, P. R311.
2. Velkavrh, I., Kalin, M., Vizintin, J. The performance and mechanisms of DLC-coated surfaces in contact with steel in boundary-lubrication conditions: a review //Strojniški vestnik, 2008, T. 54, № 3, P. 189-206.
3. Bewilogua, K., Hofmann, D. History of diamond-like carbon films-from first experiments to worldwide applications // Surface and Coatings Technology, 2014, T. 242, P. 214-225.
4. A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications / A. Tyagi et al. //International journal of refractory metals and hard materials, 2019, T. 78, P. 107-122.
5. Oriented carbyne layers / Y. P. Kudryavtsev et al. // Carbon, 1992, T. 30, № 2, P. 213-221.
6. The role of carbon orientant coatings in optimizing the lubricity of boundary layers / V.A. Levchenko et al./ Problems of mechanical engineering and reliability of machines, 2004, no. 2, pp. 43-48.
7. Semenov, A.P. Tribological properties and vacuum-plasma methods for obtaining diamond and diamond-like coatings/Friction and wear, 2009, vol. 30, no. 1, pp. 83-102.
8. Buyanovsky, I.A., Lashkhi, V.L., Samusenko, V.D. Development of the temperature method for estimation of lubricant ability of oils/Mir Nefteprod. Vestn. Neft. Komp., 2017, no. 2, pp. 28-33.
9. Investigation of the specifics of the destruction of diamond-like coatings in triboprocess. I.A. Buyanovsky et al. / Friction and lubrication in machines and mechanisms, 2013, no. 7, pp. 44-47.
10. Carbon coatings-orientants and the effectiveness of the lubricity of oils .I.A. Buyanovsky et al. /Mechanization of construction, 2013, no. 6, pp. 41-44.
11. Levchenko, V.A., Buyanovsky, I.A., Samusenko, V.N. Investigation of diamond-like monocrystalline carbon for tribotechnical application / Friction and wear, 2021, vol. 42, no. 6, pp. 725-732.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.02.2022; одобрена после рецензирования 04.03.2022; принята к публикации 11.03.2022.

The article was submitted 27.02.2022; approved after reviewing 04.03.2022; accepted for publication 11.03.2022.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Редактор Д.А. Петраченко. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 17.03.2022. Выход в свет 30.03.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

Научноёмкие технологии в машиностроении, №4 (130) 2022

«Science intensive technologies in mechanical engineering», №4 (130) 2022