

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 11 (161). С. 24-31.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 11 (161). P. 24-31.

Научная статья
УДК 621.7+06
doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-31

Методы повышения физико-механических и трибологических характеристик тяжело нагруженных металлических и металлополимерных трибосистем

Владимир Иванович Колесников¹, акад. РАН, д.т.н.
Петр Данилович Мотренко², д.т.н.
Ольга Александровна Беляк³, д.ф.-м.н.
Игорь Владимирович Колесников⁴, чл.-корр. РАН, д.т.н.
Кирилл Николаевич Политыко⁵, аспирант
Александр Иванович Воропаев⁶, аспирант

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

² Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ kvi@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4323-9268>

² priemnaya_gd@rostvert.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ o_bels@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9487-0423>

⁴ oooedt@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3265-0871>

⁵ politykokirill@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4633-5013>

⁶ vai_nano@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7564-8803>

Аннотация. Представлена методология для металлополимерных узлов трения превращения процесса трения из разрушительного в созидательный для широкого класса трибоматериалов фрикционного и антифрикционного назначения, а также смазок. Для металлических трибосистем созидательным направлением представлены исследования нитридных, алмазоподобных (DLC), высокоэнтропийных (ВЭС) покрытий. Рассмотрены основные современные методы нанесения покрытий: вакуумно-дуговой метод осаждения покрытий, магнетронный метод распыления, ионное осаждение из паровой фазы углеродных покрытий класса DLC. Рассмотрены особенности высокоэнтропийных покрытий (ВЭП) и покрытий с эффектом памяти формы (ЭПФ). Описаны основные преимущества и недостатки данных методов, а также представлены современные виды покрытий, получаемые PVD-методом. Описаны материалы и методы исследований, включающие в себя нанесение покрытий на установку BRV600, исследование физико-механических свойств, трибологические испытания. Для получения высоких показателей физико-механических и трибологических характеристик определены следующие параметры: для нитридных покрытий CrAlSiN – оптимальная толщина, для углеродных покрытий класса DLC и комбинированных покрытий CrAlSiN + DLC – оптимальная толщина покрытий и технологические режимы нанесения покрытий – величина подачи азота %N и ток индукционных катушек λ , для высокоэнтропийных покрытий TiCrZrHfNb – толщина покрытия, а для CuCrMnFeCoNi влияние меди на коэффициент трения и износостойкость. Полученные покрытия нашли свое применение в тяжело нагруженных трибосистемах: лопатки турбокомпрессора тепловоза 2ТЭ25А и шлицевого соединения трансмиссии хвостового винта вертолета МИ-26. Высокоэнтропийные покрытия предложены для демпферов, которые устанавливаются в узлах крепления двигателя к пилону или пилона к крылу магистрального самолета.

Ключевые слова: машиностроение, трибология, методы получения вакуумных покрытий, DLC-покрытия, высокоэнтропийные покрытия, покрытия с эффектом памяти формы, фрикционные и антифрикционные узлы трения

Благодарности: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30007) в Ростовском государственном университете путей сообщения.

Для цитирования: Колесников В.И., Мотренко П.Д., Беляк О.А., Колесников И.В., Политыко К.Н., Воропаев А.И. Методы повышения физико-механических и трибологических характеристик тяжело нагруженных металлических и металлополимерных трибосистем // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-31

Methods for improving stress-strain properties and tribological characteristics of heavily loaded metal and polymer tribosystems

Vladimir I. Kolesnikov¹, Academician of the RAS, D. Eng.

Peter D. Motrenko², D. Eng.

Olga A. Belyak³, Dr. Sci in Physics and Maths

Igor V. Kolesnikov⁴, Associate Member, D. Eng.

Kirill N. Polityko⁵, PG student

Alexander I. Voropaev⁶, PG student

¹ Rostov State University of Railways, Rostov-on-Don, Russia

² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ kvi@rgups.ru

² priemnaya_gd@rostvert.ru

³ o_bels@mail.ru

⁴ oooedt@rambler.ru

⁵ politykokirill@yandex.ru

⁶ vai_nano@rgups.ru

Abstract. An approach for transformation of destructive friction force to creative one in metal polymer friction units including a wide class of friction and antifriction tribomaterials, as well as lubricants, is presented in the article. For metal tribosystems, the research of nitride, diamond-like (DLC), high-energy coatings (HEC) is presented as creative possibilities. The main modern coating methods are viewed: vacuum arc deposition method of coatings, magnetron spraying method, ion vapor deposition of carbon coatings of the DLC class. The features of high-entropy coatings (HPC) and coatings with form memory effect (FME) are discussed. The main advantages and disadvantages of these methods are described, as well as modern types of coatings obtained by the PVD method are presented. Materials and research methods are given, including deposition of coating by BRV600 installation, investigation of physical and mechanical properties, tribological tests. To obtain high indicators of physical and mechanical properties and tribological characteristics, the following parameters were determined: for nitride coatings CrAlSiN – the optimal thickness, for carbon coatings of the DLC class and combined coatings CrAlSiN + DLC – the optimal coating thickness and technological modes of coating deposition – the amount of nitrogen supply %N and the current of induction coils λ , for high-energy coatings TiCrZrHfNb is the coating thickness, and for CuCrMnFeCoNi the effect of copper on the friction ratio and wear resistance. To obtain high indicators of physical and mechanical properties and tribological characteristics, the following parameters were determined: for nitride coatings CrAlSiN – the optimal thickness, for carbon coatings of the DLC class and combined coatings CrAlSiN + DLC – the optimal coating thickness and technological modes of coating deposition – the amount of nitrogen supply %N and the current of induction coils λ , for high-energy coatings TiCrZrHfNb is the coating thickness, and for CuCrMnFeCoNi the effect of copper on the friction ratio and wear resistance. The obtained coatings have found their application in heavily loaded tribosystems: the blades of the turbocharger of the 2TE25A diesel locomotive and the spline connection of the transmission of the steering rotor of the MI-26 helicopter. High-entropy coatings are proposed for dampers that are installed in the attachment points of the engine to the pylon or the pylon to the wing of the long-haul aircraft.

Keywords: mechanical engineering, tribology, methods for obtaining vacuum coatings, DLC coatings, high-entropy coatings, coatings with form memory effect, friction and anti-friction units

Acknowledgements: the research was funded with a grant at the expense of the Russian Science Foundation (project No. 21-79-30007) at the Rostov State University of Railway Engineering

For citation: Kolesnikov V.I., Motrenko P.D., Belyak O.A., Kolesnikov I.V., Polityko K.N., Voropaev A.I. Methods for improving stress-strain properties and tribological characteristics of heavily loaded metal and polymer tribosystems / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-31

Введение

В машиностроении используется множество узлов трения, которые являются

важнейшим элементом в работе машин и механизмов. Узлы могут быть различной конструкции и назначения, но все они имеют один общий принцип работы – трение между двумя

поверхностями. Узлы трения являются одним из важнейших элементов в машиностроении. Важность заключается в обеспечении плавной, безопасной и безотказной работы механизмов машиностроения [1].

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования для металлополимерных узлов трения позволили сформировать рекомендации по выбору наполнителей, армирующих и легирующих элементов как для фрикционных, так и антифрикционных узлов трения:

– для фрикционных («колесо – тормозная колодка» подвижного состава, «диск – тормозная накладка» и др.) основанием послужили разработанные комплексы программ квантовохимических расчетов по оценке влияния диффузионно-сегрегационных процессов на прочностные характеристики рабочих поверхностей трибосистем. В результате расчетных значений энергии химической связи разработана аттестация сегрегированных атомов, упрочняющих связь между кристаллами в железе и на этой основе определены элементы, добавляемые в композит и способствующие упрочнению и износостойкости металлического контртела за счет их диффузии при трении;

– для трибосистем антифрикционного назначения на основе метода неравновесной термодинамики установлены закономерности формирования пленки фрикционного переноса (ПФП) – вторичных поверхностных структур полимерных композитных материалов на металлическое контртело и показано, что кинетика процесса образования ПФП определяется величиной и направлением трибоЭДС;

– для металлических трибосистем соиздательным направлением, повышающим износостойкость и долговечность трибосопрежения является нанесение многофункциональных покрытий (нитридных, углеродных, высокоэнтропийных и с эффектом памяти формы) на металлическую поверхность трибосопрежений. При этом перспективные научные достижения относятся к углеродным материалам, среди которых выделяются алмазоподобные (DLC)-покрытия, основу которых составляет набор sp^2 – sp^3 -электронных конфигураций. Прежде чем рассмотреть методы получения

вакуумных покрытий, отметим, что вакуумная ионно-плазменная технология формирует покрытия на основе сильных межатомных связей, которые обладают высокой адгезионной и когезионной прочностью. Однако актуальность еще и в экономии дорогостоящих материалов для изделий, т. к. функциональной зоной является только поверхность, а не весь объем материала, а также достижения высоких эксплуатационных свойств на поверхности изделия.

Методы получения вакуумных покрытий

Вакуумно-дуговой метод осаждения покрытий. Реализация данного метода осуществляется за счет образования вакуумно-дугового разряда в высоком вакууме до 10^{-4} Па, который развивается в парах материала катода и приводит к генерации катодных пятен размером $10^{-6} \dots 10^{-3}$ м на поверхности самого катода, в котором за счет взрывной эмиссии электронов происходит быстрое достижение температуры кипения материала, что способствует его испарению [2]. Возникший разряд устойчиво горит в парах материала катода при стабилизации напряжения 32 В и силе регулируемого тока 90...200 А. Для ионизации и ускорения ионов плазмы на детали подается отрицательный потенциал опорного напряжения от 60 до 1000 В [3, 4].

Основной недостаток метода состоит в наличии капельной фазы в плазменном потоке размером 0,1...40 мкм. Осаждения микрокапель на поверхность подложки приводит к формированию неоднородной поверхности, повышая шероховатость, уменьшая адгезию покрытия с подложкой, увеличивая внутренние напряжения, приводя к росту дефектов структуры. Для снижения содержания капельной фазы в плазме используют сепарацию плазменного потока с помощью магнитного поля и оптимизацию электрических параметров установки для нанесения вакуумных покрытий [5].

Цель образования покрытий с помощью вакуумно-дугового метода заключается в получении защитных покрытий с сочетанием высоких физико-механических характеристик и низкого коэффициента трения. За годы развития вакуумных технологий учеными разработано множество видов покрытий для различных отраслей машиностроения, широкую

известность среди этих покрытий получили: нитридные покрытия, нанослойные композиционные покрытия.

Магнетронный метод распыления.

Реализация данного метода осуществляется путем создания высокого напряжения в разряженной газовой среде (обычно в аргоне) для создания плазмы тлеющего разряда в вакууме $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Па при температуре $100 \dots 250$ °С. При распылении ионы плазмы бомбардируют мишень из материала наносимого покрытия и выбивают атомы, сообщая им энергию, достаточную для перемещения к покрываемой детали и осаждения на ней. В этой технологии используются магниты, локализирующие плазму тлеющего разряда на отдельных участках мишени, при этом увеличивается плотность ионов, бомбардирующих поверхность. Магнетронный метод обладает рядом преимуществ в сравнении с вакуумно-дуговым методом: отсутствует капельная фаза, распыленные частицы имеют меньшую температуру, подложка не перегревается [6].

Основные преимущества данного метода заключаются в возможности повторения точного состава мишени в покрытии с высокой плотностью структуры, использование любого материала для нанесения на подложку, нанесение покрытий при низких температурах, возможностью управления качеством получаемых покрытий с помощью изменения параметров процесса нанесения, а недостатком является – небольшая скорость напыления, низкий КПД, слабая адгезия покрытия с подложкой, нестабильность фазовых составляющих покрытия, стоимость оборудования [7].

В настоящее время получаемые покрытия с помощью магнетронного распыления – металлокерамические покрытия; металлические покрытия; наноккомпозиты; алмазоподобное покрытие (АПУ), высокоэнтропийные покрытия (ВЭП).

Ионное осаждение из паровой фазы углеродных покрытий класса DLC

Осаждение DLC покрытий проводится методом импульсно-дугового испарения с поджигом дугового разряда через лазерную систему. При выполнении процесса ионного осаждения углеродных покрытий из паровой фазы для стабилизации покрытий DLC в камеру

осуществляется напуск азота, процентное содержание которого регулируется с помощью системы газонапуска. DLC-покрытия обеспечивают не только высокую твердость, характерную для алмаза и предельно низкий коэффициент трения, но и обладают технологическими методами изменять соотношение гибридизации sp^3/sp^2 , где sp^3 – доля алмазной электронной конфигурации sp^3 в структуре покрытия и графитоподобных кластеров с sp^2 связями, погруженных в углеродную матрицу с sp^3 -связями [8, 9]. В наше время актуальным направлением DLC-покрытий являются комбинированные покрытия класса MeC(MeN)/a-C:H, в частности, покрытия систем TiAlN/DLC и CrAlSiN/DLC. При использовании таких покрытий происходит существенное снижение коэффициента трения и повышение износостойкости узлов трения. При этом экспериментально показано, что смазочная среда не оказывает существенного влияния на антифрикционные свойства покрытий. Отмечается также целесообразность более высокого содержания связей sp^2 в углеродных покрытиях, которое способствует образованию графитоподобного переходного слоя во время скольжения и приводит к снижению скорости износа.

Высокоэнтропийное покрытие (ВЭП)

Получение данных покрытий стало возможно за счет появления нового класса материалов – высокоэнтропийных сплавов [10]. Это многокомпонентная система, состоящая не менее чем из пяти элементов в виде однофазного твердого раствора замещения с образованием одной фазы с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК) или гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК) и возможно образование фазы с ОЦК+ГЦК решеткой, конфигурационная составляющая энтропии на порядок выше остальных составляющих. На основе термодинамических представлений энергии Гиббса (полная потенциальная химическая энергия системы) такая система становится минимальной, что придает ей высокую термодинамическую устойчивость. Материалы относятся к классу высокоэнтропийных, если они удовлетворяют ряду критериев: параметрах энтальпии смешения $7 \leq \Delta H_{\text{mix}} \leq 22$ кДж/моль, энтропии смешения: $11 \leq \Delta S_{\text{mix}} \leq 19,5$ Дж/(К·моль), разницы атомных размеров: $0 \leq \delta \leq 8,5$, концентрации валентных электронов (VEC), так при $VEC \geq 8$ происходит

формирование одной фазы ГЦК, при $6,87 \leq VEC \leq 8$ образуется смесь ОЦК и ГЦК фаз, при $VEC \leq 6,87$ в сплаве существует одна фаза ОЦК [11].

Покрyтия с эффектом памяти формы (ЭФП)

Материалы с эффектом памяти формы – материалы с сочетанием механических, физических и химических свойств. Актуальность данных материалов заключается в функциональных возможностях: уникальными эффектами термомеханической памяти, высокими прочностными свойствами, термомеханической и термоциклической надежностью и долговечностью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Главная особенность сплавов с эффектом памяти формы осуществляется за счет прямого и обратного мартенситного превращения в условиях механического (сжатия, растяжения) и термического воздействий. Исходная аустенитная фаза при воздействии на сплав превращается полностью или частично в новую мартенситную фазу, образуя температурный мартенсит и мартенсит деформации, при снятии воздействия происходит полное или частичное обратное превращение.

Материалы и методы исследования

Нанесение покрyтия производилось на установке BRV 600, разработанной и смоделированной научным коллективом РГУПС и сделанной в Республике Беларусь компанией «БелРосВак» г. Минск. Уникальность установки заключается в том, что в универсальном подходе выполнения программ нанесения покрyтий разными методами (PVD, DLC) и их чередованием осуществляется без выемки образцов из рабочей камеры, что существенно повышает качество наносимых покрyтий из-за отсутствия влияния внешней среды. Установка оснащена мощным ионным источником, представляющим собой торцевой холловский ускоритель. В основу энергетической стимуляции процесса очистки поверхности подложки положен принцип формирования плазмы и получения интенсивных потоков ионов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Ионная бомбардировка поверхности, выполняемая непосредственно перед нанесением покрyтия, совершается с целью удаления оксидных пленок и тонких слоев металла, нагрева и активизации поверхности. Она является необходимым условием обеспечения

высокой прочности сцепления покрyтия с подложкой. Установка BRV600 представлена на рис. 1.

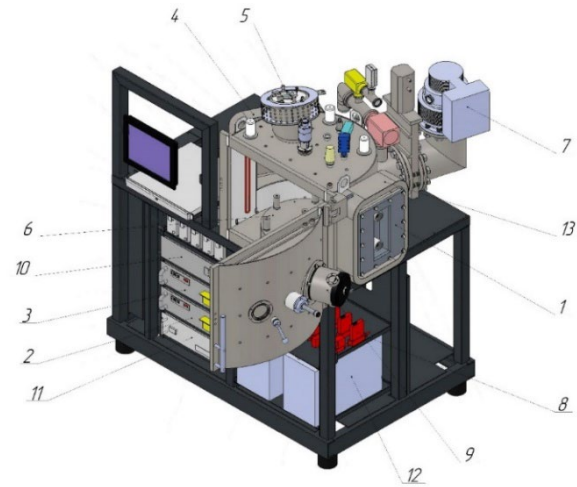


Рис. 1. Вакуумная установка BRV600:

1 – несбалансированный магнетрон; 2 – блок питания смещения; 3 – блок питания магнетрона; 4 – соленоид сепаратора фокусирующей; 5 – соленоид дугового испарителя; 6 – технологическая оснастка; 7 – турбомолекулярный насос; 8 – система газонапуска с расходомерами; 9 – ионный источник; 10 – источник бесперебойного питания; 11 – блок питания ионного источника; 12 – источник питания дугового испарителя; 13 – соленоид несбалансированного магнетрона

Fig. 1. BRV600 vacuum installation:

1 – unbalanced magnetron; 2 – HPU; 3 – magnetron power supply unit; 4 – solenoid of the fan separator; 5 – arc vaporizer solenoid; 6 – technological equipment; 7 – turbomolecular pump; 8 – meter gas intake system; 9 – ion source; 10 – uninterruptible power supply; 11 – ion source power supply; 12 – arc evaporator power supply; 13 – unbalanced magnetron solenoid

Осаждение нитридных покрyтий производилось на образцы-подложки из конструкционных сталей с азотированной поверхностью 38X2МЮА и цементованной – 12Х2Н4А вакуумно-дуговым методом. Нанесение DLC и ВЭП осуществлялось на подложку из конструкционной стали 40ХН2МА с низким (литер «Н») и высоким (литер «В») отпуском, отметим, что высокоэнтропийное покрyтие TiCrZrHfNb было получено вакуумно-дуговым методом, а CuCrMnFeCoNi с эквивалентной мишени магнетронным распылением.

Исследования физико-механических свойств (твердости H , модуля упругости E) определялись с использованием установки Nanotest-600 по методу непрерывного индентирования. Кроме того, выполнялся расчет соотношений H/E (сопротивление упругой деформации) и H^3/E^2 (сопротивление пластической деформации) [12].

Трибологические испытания образцов с покрытиями выполнялись на установке TRB (Швейцария) по схеме «штифт – пластина» при возвратно-поступательном движении пластины и при движении штифта по круговой траектории. Измеряемые характеристики: коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца с покрытием J .

Результаты исследований

1. Нитридные покрытия

Исследование нитридных покрытий CrAlSiN и их сравнение со свойствами азотированной стали 38ХМЮА и цементованной стали 12Х2Н4А приведено в табл. 1

1. Экспериментальные данные свойств исследуемых покрытий CrAlSiN на азотированной стали 38ХМЮА и цементованной стали 12Х2Н4А

1. Experimental data on the properties of CrAlSiN coatings under study, deposited on nitrided steel 38CrMoAlA and cemented steel 12Cr2Ni4A

Тип подложки	Тип покрытия	H , ГПа	E , ГПа	H/E	H^3/E^2 , ГПа	μ	$J \times 10^{-7}$, мм ³ /Н/м	h , мкм
38ХМЮА	Азотированный слой	12,0	241,0	0,049	0,0297	0,528	4,50	3,96
	CrAlSiN	22,8	259,7	0,087	0,286	0,501	1,68	1,0
12Х2Н4А	Цементованный слой	6,42	20	3,21	0,660	9,00	12,3	4,46
	CrAlSiN	24,1	251,3	0,095	0,288	0,451	0,79	1,0

Из анализа табл. 1. можно сделать вывод, что использование покрытия CrAlSiN повышает как прочностные характеристики стальной поверхности (H ; E ; H/E ; H^3/E^2), так и трибологические (μ , J), а главное, обеспечивается высокая износостойкость. Следует отметить, что толщина покрытия оказывает влияние на его износостойкость, так для покрытия CrAlSiN оптимальное значение толщины является $1,0 \pm 0,2$ мкм. Отметим, что покрытие на более пластичной подложке из стали 12Х2Н4А обладает износостойкостью выше, чем покрытие на твердой подложке из стали 38Х2МЮА.

Поверхность, на которую наносились покрытия при шероховатости не ниже 10-го класса ($Ra \leq 0,12$ мкм и $Rz \leq 0,6$ мкм) обеспечивали качественное осаждение данных покрытий, обладающих высокой износостойкостью.

2. DLC-покрытия

При нанесении DLC-покрытий важным было определение влияния технологических параметров на толщину покрытия, на соотношение физико-механических свойств покрытия и подложки, которые влияют на формирование напряженного состояния в зоне контакта, а в итоге на адгезию покрытия. И в этом плане нами определены технологические пути стабилизации толщины DLC-покрытий растворенными атомами азота, а также влияния материала подслоя Ti, комбинированных покрытий CrAlSiN + DLC на свойства алмазоподобных покрытий.

В результате исследования ними было установлено, что величина подачи азота в камеру $\%N$, ток индукционных катушек λ , давление в

камере P и время осаждения t обеспечивают влияние на физико-механические и трибологические характеристики покрытия, но наиболее эффективными являются $\%N$ и λ . Углеродные покрытия DLC с подслоем титана, полученные на подложке из стали 40ХН2МА по оптимальным режимам нанесения при значениях технологических параметров $\%N = 5,5 \pm 0,5$ % и $\lambda = 2,0 \pm 0,2$ А, позволяют получить высокую износостойкость из-за того, что твердое покрытие блокирует выход дислокации на поверхность подложки и тормозит тем самым процесс разрушения. При нанесении двухслойных комбинированных покрытий системы CrAlSiN+DLC оптимальные режимы нанесения слоя DLC смещаются к границе наибольших значений интервала параметров $\%N$ и λ , используемого для осаждения покрытий DLC с подслоем Ti. Установлено, что общая толщина комбинированных покрытий находится в пределах $h = 0,85 \dots 2,25$ мкм ($h_{cp} = 1,43$ мкм), данная величина толщины демонстрирует высокие физико-механические и трибологические характеристики. Исследования покрытий с большей толщиной показало, что при увеличении толщины свыше 2,5 мкм покрытие становится хрупким и при проведении трибологических испытаний разрушается.

3. Высокотропийные покрытия

Результаты сравнительных физико-механических и трибологических исследований покрытий TiCrZrHfNb и CuCrMnFeCoNi представлены в табл.

2. Экспериментальные данные свойств исследуемых покрытий TiCrZrHfNb и CuCrMnFeCoNi

2. Experimental data on the properties of the coatings under study TiCrZrHfNb and CuCrMnFeCoNi

Тип подложки	Тип покрытия	H , ГПа	E , ГПа	H/E	H^3/E^2 , ГПа	μ	$J \times 10^{-7}$, мм ³ /Н/м	h , мкм
40XH2MA	TiCrZrHfNb	8,22	135,0	0,0615	0,0314	0,45	4,16	4,03
	CuCrMnFeCoNi	8,28	144,1	0,0590	0,034	0,10	Не обнаружено	11

Результатом проведенных трибологических исследований покрытия TiCrZrHfNb является найденное сочетание материала подслоя и толщины покрытия ВЭС системы (4...5 мкм), которое позволило снизить износ покрытия в 5 – 6 раз по сравнению с традиционным сочетанием подслоя и толщины покрытия 1,0...2,5 мкм при коэффициенте трения 0,45. Если сравнивать физико-механические характеристики покрытий TiCrZrHfNb и CuCrMnFeCoNi (табл. 2), то можно отметить, что свойства покрытий находятся на одном уровне, но добавление Cu в состав мишени значительно снизило коэффициент трения до 0,1, что соответствует DLC-покрытиям, но отметим, что износ покрытия не наблюдался. С учетом, что толщина CuCrMnFeCoNi составила 11 мкм, а для TiCrZrHfNb 4,03 мкм, то это различие может являться одной из причин высокой износостойкости порытый CuCrMnFeCoNi.

Заключение

В результате теоретических (квантово-химических расчетов) и экспериментальных исследований установлено, что при трении фрикционных металлополимерных сопряжений одни атомы (бор, ванадий, хром), выделившиеся из полимера и диффундирующие в металлическое контртело, упрочняют связь между кристаллами в железе, а другие (сера, фосфор, цинк) способствуют разупрочнению. Для антифрикционных узлов трения установлены закономерности образования вторичных поверхностных структур на поверхности металлического контртела и на этой основе предложена технология модифицирования полимеров, обеспечивающая низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. Что касается нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, то установлено, что для нитридного покрытия CrAlSiN толщина покрытия влияет на износостойкость, оптимальная толщина покрытия составила $1,0 \pm 0,2$ мкм. Для

комбинированных DLC-покрытий были определены технологические параметры, при которых покрытие имеет высокую износостойкость. Эффективное влияние на свойства покрытий оказывают: величина подачи азота в камеру $\%N = 5,5 \pm 0,5$ % и ток индукционных катушек $\lambda = 2,0 \pm 0,2$ А. Для высокоэнтропийного покрытия TiCrZrHfNb было обнаружено, что при толщине 4...5 мкм происходит снижение износа в 5...6 раз по сравнению с традиционным сочетанием подслоя и толщины покрытия 1,0...2,5 мкм. Добавление Cu в мишень CrMnFeCoNi позволило получить коэффициент трения 0,1 без следов износа при проведении трибологических испытаний.

Широкий диапазон свойств разработанных нами ионно-плазменных покрытий позволят применить их в различных узлах трения как фрикционных, так и антифрикционных. Так покрытия нашли применение в тяжело нагруженных трибосистемах: лопатки турбокомпрессора тепловоза 2ТЭ25А и шлицевого соединения трансмиссии хвостового винта вертолета МИ-26. Высокоэнтропийные покрытия не только обладают высокой износостойкостью, но и широким спектром варьирования значений коэффициента трения, что позволило предложить их для демпферов, которые устанавливаются в узлах крепления двигателя к пилону или пилону к крылу магистрального самолета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колесников И.В., П.Д. Мотренко, В.И. Колесников, Д.С. Мантуров. Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путём формирования структуры и свойств их поверхностного слоя // М.: ВИНТИ РАН, 2021. 168 с.
2. Колесников И.В. Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения // М.: ВИНТИ РАН, 2017. 384 с.
3. Зимин А.М., Иванов В.А., Ютнер Б. Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом

вакуумном разряде // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». 2001. № 2. С. 44–50.

4. Колесников И.В., Мотренко П.Д., Колесников В.И., Новиков Е.С. Теоретико-экспериментальные исследования закономерностей изменения структурно-фрикционных свойств поверхностных слоев металлополимерных трибосистем. Разработка методов повышения износостойкости // М.: ВИНТИ РАН, 2022. 136 с.

5. Андреев А.А., Саблев Л.П., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые покрытия // Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. 318 с.

6. Филатов М.С., Стогней О.В. Получение композитов Ni-ZrO₂ с разной концентрацией металлической фазы методом магнетронного ВЧ реактивного напыления // Материалы 13 Международной конференции «Пленки и покрытия – 2017» Санкт-Петербург; 2017. С. 106–109.

7. Локтев Д., Ямашин Е. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий // Наноиндустрия. 2007. № 4. С. 18–24.

8. Senthilkumar R., Prabhu S., Cheralathan M. Experimental investigation on carbon nano tubes coated brass rectangular extended surface // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 50. P. 1361–1368.

9. Spencer E.G., Schmidt P.H., Joy D.C., Sansalone F.J. Ion-beam-deposited polycrystalline diamond-like films // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 29. P. 118–120.

10. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., et al. Chang Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // Advanced Engineering Materials. 2004. Vol. 6. P. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.

11. Погребняк А.Д., Комаров Ф.Ф., Береснев В.М., Константинов С.В. и др. Многокомпонентные и высокоэнтروпийные сплавы и нитридные покрытия на их основе. // М.: ЛЕНАНД., 2021. 336 с.

12. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. // М.: Машиностроение, 2009. 312 с.

REFERENCES

1. Kolesnikov I.V., P.D. Motrenko, V.I. Kolesnikov, D.S. Manturov. Increasing the wear resistance of metallic and metal-polymer tribosystems by forming the structure and

properties of their surface layer // Moscow: VINITI RAS, 2021, 168 p.

2. Kolesnikov I.V. System analysis and synthesis of processes occurring in metal polymer friction units for friction and antifriction purposes // Moscow: VINITI RAS, 2017, 384 p.

3. Zimin A.M., Ivanov V.A., Juttner B. Dynamics of cathode spots on the beryllium surface in an arc vacuum discharge // Issues of atomic science and technology. Thermo-nuclear fusion series, 2001, no. 2, pp. 44–50

4. Kolesnikov I.V., Motrenko P.D., Kolesnikov V.I., Novikov E.S. Theoretical and experimental studies of the patterns of changes in the structural and frictional properties of the surface layers of metal polymer tribosystems. Development of methods for increasing wear resistance // Moscow: VINITI RAS, 2022. 136 p.

5. Andreev A.A., Sablev L.P., Grigoriev S.N. Vacuum arc coatings // Kharkiv: NSC KHFTI, 2010, 318 p.

6. Filatov M.S., Stogney O.V. Production of Ni-ZrO₂ composites with different concentrations of the metal phase using magnetron HF reactive spraying // Proceedings of the 13th International Conference «Films and Coatings – 2017» St. Petersburg; 2017, pp. 106–109.

7. Loktev D., Yamashin E. Methods and equipment for depositing wear-resistant coatings // Nanoindustry. 2007. no. 4. pp. 18–24.

8. Senthilkumar R., Prabhu S., Cheralathan M. Experimental investigation on carbon nano tubes coated brass rectangular extended surface // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 50. P. 1361–1368.

9. Spencer E.G., Schmidt P.H., Joy D.C., Sansalone F.J. Ion-beam-deposited polycrystalline diamond-like films // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 29. P. 118–120.

10. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., et al. Chang Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // Advanced Engineering Materials. 2004. Vol. 6. P. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.

11. Pogrebnyak A.D., Komarov F.F., Beresnev V.M., Konstantinov S.V., et al. Multicomponent and high-entropy alloys and nitride coatings based on them. // Moscow: LENAND., 2021, 336 p.

12. Golovin Yu.I. Nanoindentation and its possibilities. // Moscow: Mashinostroenie, 2009, 312 p.

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 25.05.2024; одобрена после рецензирования 11.06.2024; принята к публикации 19.06.2024

The article was submitted 25.05.2024; approved after reviewing 11.06.2024; assepted for publication 19.06.2024