

Научная статья

УДК 621.793

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-36-44

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СОЗДАНИИ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОТПУСКА

Д.С. Горлов¹, Д.А. Александров¹, П.Д. Черединов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования трибологических свойств износостойкого ионно-плазменного покрытия для повышения ресурса деталей с низкой температурой отпуска. Установлено, что данное износостойкое покрытие толщиной от 7 до 10 мкм состоит из демпфирующего нижнего и износостойкого верхнего слоев, имеет коэффициент трения 0,12, общую интенсивность изнашивания пары трения $0,012 \cdot 10^{-3}$ мм/м, средний суммарный линейный износ пары трения 0,012 мм в среде авиационного топлива в паре со свинцово-сурьмянистой бронзой.

Ключевые слова: трибологические свойства, низкая температура отпуска, износостойкость, ассистированное вакуумно-дуговое осаждение

Для цитирования: Горлов Д.С., Александров Д.А., Черединов П.Д. Возможности применения ионно-плазменной технологии при создании износостойкого покрытия для защиты деталей с низкой температурой отпуска // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-36-44.

Scientific article

THE POSSIBILITIES OF USING ION-PLASMA TECHNOLOGY IN THE CREATION OF A WEAR-RESISTANT COATING TO PROTECT PARTS WITH LOW TEMPERING TEMPERATURE

D.S. Gorlov¹, D.A. Alexandrov¹, P.D. Cheredinov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the tribological properties of a wear-resistant ion-plasma coating to increase the service life of parts with a low tempering temperature. It has been found that this wear-resistant coating, with a thickness of 7 to 10 microns, consists of a damping lower and wear-resistant upper layers, has a coefficient of friction of 0.12, the total wear rate of the friction pair is $0,012 \cdot 10^{-3}$ mm/m, the average total linear wear of the friction pair is 0,012 mm in an aviation fuel environment paired with antimony lead bronze.

Keywords: tribological properties, low tempering temperature, wear resistance, assisted vacuum arc deposition

For citation: Gorlov D.S., Alexandrov D.A., Cheredinov P.D. The possibilities of using ion-plasma technology in the creation of a wear-resistant coating to protect parts with low tempering temperature. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-36-44.

Введение

Одна из проблем современного машиностроения – износ машин и деталей, что предполагает увеличение ежегодных расходов на их обслуживание. Износ деталей чаще всего связан с постепенным поверхностным разрушением материала детали вследствие механического, теплового, химического и электрического воздействия [1]. Это приводит к поиску новых, более эффективных методов нанесения износостойких и коррозионных покрытий [2]. В настоящее время в машиностроении >80 % деталей имеют металлические, керамические, полимерные или композиционные покрытия для защиты от коррозии, износа и высокотемпературного окисления, а также для специальных целей – уплотнения, создания термических барьеров, требуемых оптических характеристик, декоративных свойств и др. [3].

Детали узлов трения в зависимости от их назначения изготавливают из конструкционных, фрикционных, износостойких и антифрикционных материалов широкой номенклатуры. Из конструкционных сталей изготавливают детали, которые должны удовлетворять условиям высокой прочности, жесткости или податливости и иметь на тех или иных участках поверхности трения. Это детали типа валов, пальцев, болтов шарниров, зубчатых колес и т. д. [4].

Выбор материалов пар трения представляет собой трудную задачу, так как зависит от конструкции и назначения узлов, технологии производства, условий эксплуатации, от требований к общей прочности деталей, сроку их службы и надежности при учете стоимости материала и эксплуатационных расходов.

Данная пара материалов может в одних условиях быть износостойкой, а в других нет. Выбор износостойких материалов связан с видом износа. В первую очередь материалы должны гарантировать, что при заданных условиях трения на поверхности трения не возникнут недопустимые виды изнашивания – например, молекулярное схватывание, которое приводит к задирам. Для допустимых форм износа материалы должны обеспечивать минимальную интенсивность изнашивания при данных условиях работы [5].

При выборе материалов пар трения, помимо их высокой износостойкости, к ним предъявляется и ряд требований, которые включены в понятие антифрикционности материала. К таким требованиям в первую очередь относятся: легкая прирабатываемость; высокая износостойкость и низкий коэффициент трения при нормальных условиях работы, мало изменяющийся в зависимости от скорости скольжения и времени неподвижного контакта; плавность медленных перемещений, низкий коэффициент трения и отсутствие молекулярного схватывания в условиях несовершенной смазки и при перерывах в смазке; достаточная жесткость в стыках [6].

Нанесение износостойкого покрытия осуществляют в основном на самую уязвимую часть пары трения. Другую деталь пары трения стараются делать из материала с высокими антифрикционными свойствами для снижения коэффициента трения и износа. К таким материалам относят бронзы различных марок. В современном авиационном материаловедении ведутся разработки композиционных антифрикционных материалов, получаемых методами литейного производства, компактирования и брикетирования с применением возможностей спар-плазменных методов [1].

Например, проведенные практические испытания прецизионных пар трения, применяемых в авиации, показали преимущества вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий различного назначения. Повышение свойств ионно-плазменных покрытий возможно при одновременном воздействии в процессе формирования покрытия газового и плазменного потоков (так называемого ассистированного осаждения), в результате которого повышаются эрозионная и коррозионная стойкость, да и сам процесс нанесения покрытия протекает в особых условиях, что позволяет нивелировать разницу в значениях температурных коэффициентов линейного расширения и создавать сжимающие напряжения роста [7–10]. Эти вариации вакуумно-дугового способа нанесения покрытий основаны на вакуумно-плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ).

Цель данной работы – изучение возможности защиты детали из цементуемой стали мартенситного класса с низкой температурой отпуска ионно-плазменным комбинированным покрытием в паре трения с деталью из свинцово-сурьмянистой бронзы в среде авиационного топлива (керосина).

Материалы и методы

Для исследований трибологических свойств и испытаний изготовлены образцы из цементуемой стали мартенситного класса с цементованным слоем глубиной 1,1 мм с твердостью ≥ 60 HRC в виде дисков диаметром 60 мм и толщиной 7 мм, моделирующие детали на которые наносится износостойкое покрытие. Данные стали имеют высокую статическую прочность (1300 МПа) при твердости цементованного слоя ≥ 60 HRC, но минимальную температуру отпуска (~ 350 °С). Моделирующие контртело пальцы диаметром 6,35 мм и длиной 40 мм изготавливали из свинцово-сурьмянистой бронзы. Бронза обладает отличными антифрикционными свойствами, легко прирабатывается, не склонна к заеданию и хорошо противостоит износу. Коэффициент трения составляет: 0,008 – со смазкой; 0,11 – в среде авиационного топлива (керосина); 0,15 – без смазки.

В качестве износостойкого покрытия выбрано слоистое комбинированное покрытие, состоящее из демпфирующего подслоя системы «никель–хром» и верхнего износостойкого слоя системы «никель–хром–молибден» с карбидным упрочнением. Предложенный вариант износостойкого покрытия наносили на промышленной ионно-плазменной установке (ИПУ) с возможностью ассистированного осаждения.

Отличительной особенностью данной модели ИПУ (помимо газоразрядного источника ионов аргона E×H-типа с током до 200 мА и напряжением до 3 кВ; вакуумно-дугового генератора плазмы токопроводящего материала с током до 750 А; системы для подачи в вакуумный объем реакционного газа и регулирования его давления; системы для подачи и регулирования напряжения на обрабатываемые изделия в диапазоне от 1 до 900 В) является наличие ионного ускорителя, который позволяет проводить процессы ассистированного осаждения конденсированных покрытий. При ассистированном осаждении происходит периодическая бомбардировка поверхности изделия ионами газа с энергией 20–40 кэВ, при этом может меняться межплоскостное расстояние между атомами в кристаллической решетке покрытия и тем самым могут меняться конечные свойства разрабатываемых покрытий.

При отработке технологических режимов нанесения износостойких покрытий на ИПУ учитывали следующие параметры осаждения: ток вакуумной дуги и напряжение смещения на подложке (образце). Метод ВПТВЭ позволяет варьировать вольт-амперные характеристики процесса осаждения износостойкого покрытия таким образом, что возможно контролировать температурное воздействие на материал детали, тем самым можно наносить защитные и упрочняющие покрытия на материалы с низкой температурой отпуска (~ 350 °С).

Образцы в виде дисков из цементуемой стали мартенситного класса располагали в рабочей камере ИПУ так, чтобы максимальное напыление происходило в центре образца. Следует отметить, что максимум напыления в промышленных ИПУ – один из значимых параметров осаждения покрытий. Данная величина неизменна в каждой установке и должна оставаться такой после различных операций технического обслуживания, в том числе и после замены электромагнитного фиксатора катодных пятен. По мере совершенствования установок данный параметр может немного отличаться, но всегда должен соблюдаться, исходя из особенностей изделий для каждого предприятия, и составлять расстояние от среза торца держателей изделий до середины магнитного фиксатора плюс 25 мм.

Одним из преимуществ метода ВПТВЭ или вакуумно-дугового метода нанесения является высокая скорость осаждения покрытия за счет капельной фазы. Капельная фаза уменьшается по мере снижения тока вакуумной дуги, однако полностью исключить ее достаточно сложно, поэтому для снижения шероховатости поверхности конденсата с целью улучшения класса покрытия образцы подвергали виброгалтовке и виброполированию.

Цементуемые стали мартенситного класса обладают низкой коррозионной стойкостью. Во избежание появления коррозионных повреждений на поверхности образцов поверхностное выглаживание (виброгалтовку и виброполирование) проводили в круговом и лотковом вибраторах без использования смазочно-охлаждающей жидкости.

Для повышения адгезионной составляющей перед нанесением износостойкого покрытия образцы обдували мелким электрокорундом в камере эжекторного типа. Далее проводили серийную чистку образцов.

Для комплексной оценки правильности выбора вариантов износостойких покрытий проведены сравнительные испытания на износ на универсальном трибометре, оснащённом датчиком силы DFH-100 (диапазон измерения 1000 Н) и вращательным приводом с ванночкой для жидкости.

Триботехнические испытания образцов антифрикционных материалов производили в соответствии с СТО 1-595-2-476–2015 по схеме «диск–палец». Сущность метода испытаний по этой схеме заключается в относительном скольжении торца пальца по плоской поверхности диска с обеспечением постоянной силы прижатия. В данном случае диск, вращаясь с угловой скоростью ω , обеспечивает постоянную скорость скольжения. Палец диаметром 6,35 мм в сечении приводится в контакт с поверхностью диска с заданной нормальной нагрузкой F . Схема триботехнических испытаний по схеме «диск–палец» приведена на рис. 1.

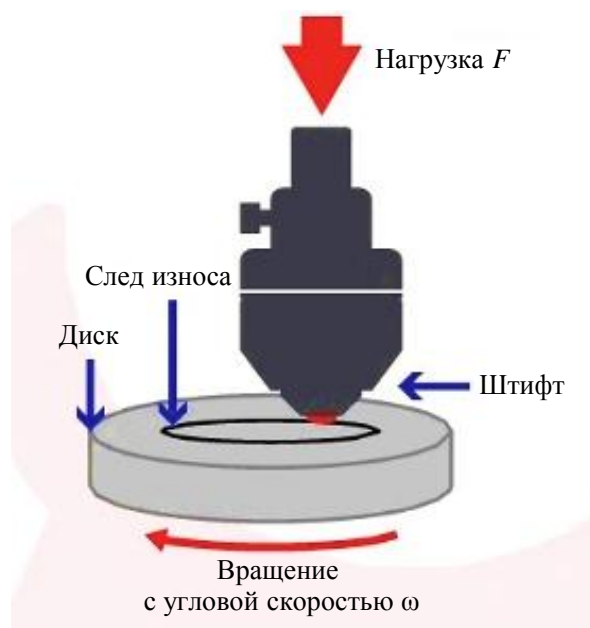


Рис. 1. Схема триботехнических испытаний по схеме «диск–палец»

Триботехнические испытания проводили в среде авиационного топлива (керосина) марки ТС-1. Скорость скольжения при испытаниях в этой среде выбрана 0,3 м/с, что обеспечивает ламинарное течение жидкости в испытательной ванне без турбулентных возмущений. Таким образом, предотвращается разрыв жидкостной пленки и отсутствует сухое трение.

Выбраны следующие условия триботехнических испытаний:

Среда..... авиационное топливо марки ТС-1
 Нагрузка.....300 Н
 Скорость скольжения.....0,3 м/с
 Продолжительность испытания.....2 ч
 Радиус дорожки трения.....20 мм

В результате получены: средний коэффициент трения, линейный износ пары трения и изменение массы пальца.

Метод ВПТВЭ, которым наносили износостойкое покрытие, является высокоэнергетическим, однако имеется возможность управлять энергией частиц и при неправильно выбранных параметрах осаждения возможно перегреть материалы образцов, а в последующем и изделий, что приведет к их разупрочнению. Поэтому для подтверждения стабильности процесса нанесения без разупрочнения проводили замеры твердости по методу Роквелла образцов до напыления и после.

Для определения шероховатости поверхности износостойкого покрытия после нанесения и после виброгалтовки и виброполировки проводили замеры микронеровностей поверхности с помощью профилометра-профилографа.

Металлографические исследования образцов-свидетелей из цементуемой стали мартенситного класса со слоистым комбинированным покрытием осуществляли после испытаний на износостойкость при температуре 20 °С на инвертируемом оптическом микроскопе с системой анализа изображения при увеличении $\times 1000$.

Рентгеновская съемка выполнена с применением дифрактометра в монохроматическом $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении ($\lambda = 0,15418$ нм), в диапазоне угла $2\theta = 25\text{--}110$ градусов с шагом $\Delta 2\theta = 0,013$ градуса и выдержкой 50 с. Расшифровка дифрактограмм проведена с применением специализированной программы и базы данных. Исследование текстуры выполнено методом построения прямых полюсных фигур.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Для установления начального уровня свойств проведены триботехнические испытания по схеме «диск–палец» образца из цементуемой стали мартенситного класса с цементованным слоем глубиной 1,1 мм и твердостью ≥ 60 HRC без покрытия и с покрытием и пальца из свинцово-сурьмянистой бронзы в среде авиационного топлива (керосина) марки ТС-1.

Поверхность дисков перед цементацией и после подготавливали до уровня шероховатости R_a не менее 0,2 с применением набора алмазных полировальных паст.

В результате проведения испытаний на износ получены следующие значения триботехнических характеристик образцов из цементуемой стали мартенситного класса без покрытия и с покрытием и пальца из свинцово-сурьмянистой бронзы в среде авиационного топлива, приведенные в таблице.

Значения триботехнических характеристик для образцов из цементуемой стали мартенситного класса без покрытия и с покрытием и пальца из свинцово-сурьмянистой бронзы в среде авиационного топлива

Состояние образца	Средний коэффициент трения	Общая интенсивность изнашивания пары трения, мм/м	Средний суммарный линейный износ пары трения, мм
Без покрытия	0,15	$0,04 \cdot 10^{-3}$	0,0194
С покрытием	0,12	$0,012 \cdot 10^{-3}$	0,0120

При триботехнических испытаниях установлено, что во время испытаний отсутствует шум (скрежет, свист), получены стабильные значения коэффициента трения в зоне трения, отсутствуют продукты износа.

Измерение твердости поверхности проводили на плоскопараллельных шлифованных образцах после вакуумной цементации (при толщине цементованного слоя 1,1 мм) и нанесения износостойкого покрытия толщиной до 0,01 мм.

По результатам замера на образцах из цементуемой стали мартенситного класса после вакуумной цементации твердость составляет 63 HRC, а после нанесения износостойкого покрытия твердость образцов существенно не снижается и составляет 62 HRC, что свидетельствует о правильно подобранных параметрах осаждения.

Для уменьшения микронеровностей на поверхности износостойкого покрытия применяли круговой и лотковый вибраторы. Контроль состояния поверхности проводили после осаждения износостойкого покрытия, уровень шероховатости которого составил в среднем 3,7 мкм, а после виброгалтовки: в течение первого часа 0,9 мкм, в течение второго часа 0,6 мкм; после виброполировки: в течение первого часа 0,4 мкм, в течение второго часа – аналогичное значение.

Для подтверждения толщины износостойкого покрытия проведены металлографические исследования в исходном состоянии после нанесения и после виброгалтовки с виброполировкой (рис. 2).

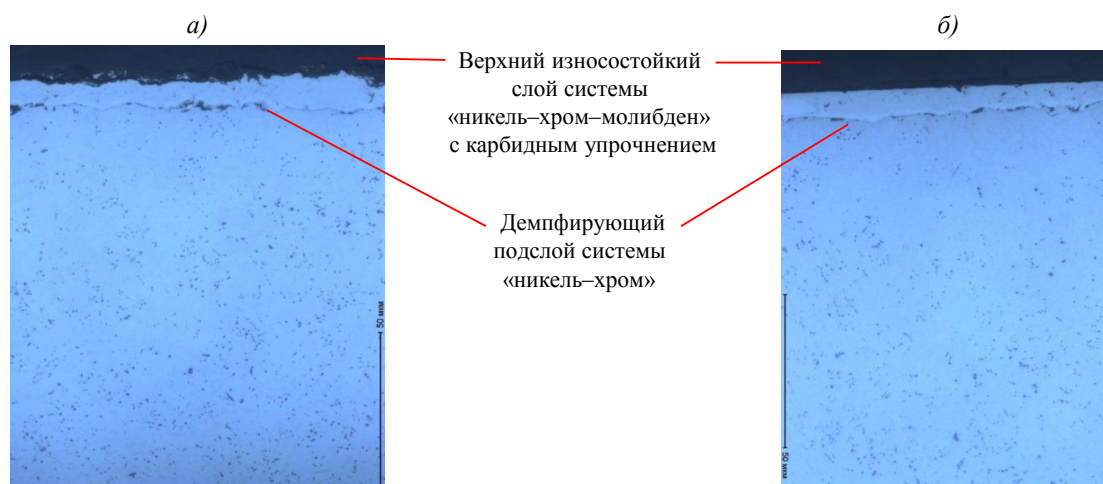


Рис. 2. Микроструктура образца из цементуемой стали мартенситного класса с износостойким покрытием в исходном состоянии после нанесения (а) и после виброгалтовки с виброполировкой (б)

На микроструктурах отчетливо видна граница раздела «сплав–покрытие» с характерным рельефом от обдувки электрокорундом. Виден также переходный демпфирующий подслой системы «никель–хром» и верхний износостойкий слой системы «никель–хром–молибден» с карбидным упрочнением.

Установлено, что средняя толщина нанесенного износостойкого покрытия составляет от 10 до 12,8 мкм. Толщина покрытия после поверхностной обработки, включая виброгалтовку с виброполировкой, составляет от 7,5 до 9,2 мкм.

При исследовании нанесенного покрытия проведен качественный фазовый анализ состава поверхностного слоя образцов из цементуемой стали мартенситного класса с износостойким покрытием после нанесения его с ассистированным осаждением и без него.

Качественный фазовый состав поверхностного слоя образцов идентичен. Наиболее интенсивной фазой на дифрактограммах является твердый раствор на основе Ni_3Al , вторая по интенсивности фаза – твердый раствор на основе Mo.

На дифрактограммах исследованных образцов наблюдается значительное несоответствие бестекстурному состоянию экспериментальных интенсивностей рентгеновских линий фазы Ni_3Al , что свойственно, например, алмазоподобным покрытиям [11–14]. Возникновение аксиальной текстуры является следствием избирательного роста, связанного с характеристиками направленного процесса осаждения покрытий. Для подтверждения формирования текстуры выборочно построены прямые полюсные фигуры (111) фазы Ni_3Al . Вид кольцевых полюсных фигур свидетельствует о формировании аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$ (рис. 3).

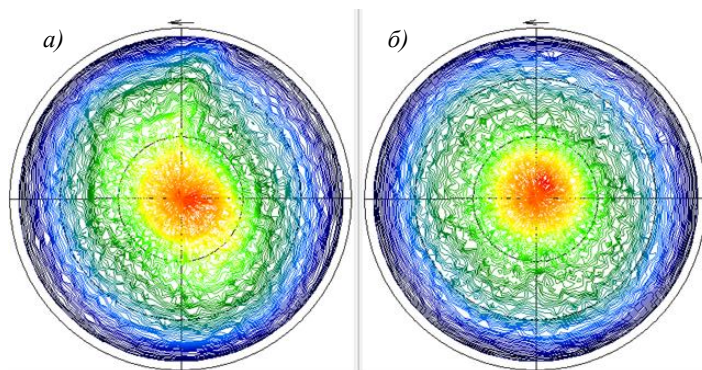


Рис. 3. Прямые полюсные фигуры (111) для образцов из цементуемой стали мартенситного класса с износостойким покрытием, нанесенным без ассистированного осаждения (а) и при ассистированном осаждении (б)

Качественно острота текстуры ниже у образца из цементуемой стали мартенситного класса с износостойким покрытием, нанесенным при ассистированном осаждении, что косвенно указывает на увеличение анизотропии функциональных свойств покрытия и снижение значений коэффициента трения. Данное ионно-плазменное покрытие может найти применение для защиты деталей трения в морской, наземной и авиационной технике [15].

Заключения

Проведены исследования свойств износостойкого ионно-плазменного покрытия системы «никель–хром + никель–хром–молибден» с карбидным упрочнением для защиты деталей трения с низкой температурой отпуска.

Установлено, что средняя толщина нанесенного износостойкого покрытия составляет от 10 до 12,8 мкм. Толщина покрытия после поверхностной обработки, включая виброгалтовку с виброполировкой, составляет от 7,5 до 9,2 мкм.

Установлено, что износостойкое покрытие имеет коэффициент трения 0,12, общую интенсивность изнашивания пары трения $0,012 \cdot 10^{-3}$ мм/м, средний суммарный линейный износ пары трения 0,012 мм. По результатам испытаний на износостойкость в среде авиационного топлива с контртелом из свинцово-сурьмянистой бронзы общая износостойкость системы «цементуемая сталь–износостойкое покрытие» увеличилась в 1,6 раза по сравнению с цементуемой сталью без покрытия. Установлено также снижение коэффициента трения в 1,25 раза.

Данное износостойкое комбинированное ионно-плазменное покрытие возможно применять для защиты деталей из цементуемой стали мартенситного класса с низкой температурой отпуска в паре трения с деталью из свинцово-сурьмянистой бронзы в среде авиационного топлива (керосина).

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.

2. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
3. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
4. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Чуманов И.Р., Лещев Н.Е. Новый износостойкий сплав на кобальтовой основе: влияние кремния и углерода на структуру и триботехнические характеристики. Часть 1 // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-59-69.
5. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В. и др. Износостойкие детонационные покрытия на основе карбида вольфрама для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
6. Хмелева К.М., Князев А.В., Заварзин С.В. Разработка многофункциональной смазки для резьбовых соединений // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 3 (76). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-119-133.
7. Артеменко Н.И., Мубояджян С.А. Инженерная методика оценки величины и характера внутренних напряжений в однослойных упрочняющих конденсированных покрытиях // *Труды ВИАМ*. 2016. № 1 (37). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-25-35.
8. Мубояджян С.А. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала // *Металлы*. 2008. № 2. С. 20–34.
9. Белоус В.Я., Варламова В.Е., Мубояджян С.А., Александров Д.А. Ионно-плазменные покрытия для защиты от коррозии компрессорных лопаток и других деталей ГТД, эксплуатирующихся во всеклиматических условиях // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. № 1. С. 20–24.
10. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Ионно-плазменные нанослойные эрозионно-стойкие покрытия на основе карбидов и нитридов металлов // *Металлы*. 2010. № 5. С. 39–51.
11. Хрущов М.М., Марченко Е.А., Дубравина А.А., Семенов А.П. Структурные особенности алмазоподобных покрытий с различным механизмом легирования и их трибологические характеристики // *Физика, химия и механика трибосистем*. 2011. № 10. С. 147–152.
12. Кононов Д.М., Жданов А.А., Морозов В.В. Получение и исследование алмазоподобных PVD-покрытий // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. № 6. С. 275–278.
13. Muratore C., Jones D.R., Voevodin A.A. Smart tribological coating with wear sensing capability // *Wear*. 2008. Vol. 265. P. 913–920.
14. Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications // *MLBT, Air Force Research laboratory (US) // Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 55. P. 741–748.
15. Mehran Q.M., Fazal M.A., Razak B.A., Rubaiee S. A Critical Review on Physical Vapor Deposition Coatings Applied on Deferent Engine Components // *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*. 2018. Vol. 43. No. 2. P. 158–175.

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N., Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

3. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
4. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Chumanov I.R., Leshchev N.E. New wear-resistant cobalt-based alloy: effect of silicon and carbon on structure and tribotechnical characteristics. Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-59-69.
5. Batraev I.S., Rybin D.K., Ivanyuk K.V., Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A. Wear resistant detonation coatings based on tungsten carbide for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
6. Khmeleva K.M., Knyazev A.V., Zavarzin S.V. Development of multifunctional lubricant for threaded connections. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-119-133.
7. Artemenko N.I., Muboyadzhyan S.A. Engineering method of estimating the magnitude and nature of the internal stresses in the condensed monolayer reinforcing coatings. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 4. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 19, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-25-35.
8. Muboyadzhyan S.A. Features of deposition from a two-phase flow of multicomponent vacuum-arc discharge plasma containing microdroplets of evaporated material. *Metally*, 2008, no. 2, pp. 20–34.
9. Belous V.Ya., Varlamova V.E., Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A. Ion-plasma coatings for corrosion protection of compressor blades and other gas turbine engine parts operated in all-climate conditions. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2012, no. 1, pp. 20–24.
10. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Ion-plasma nanolayer erosion-resistant coatings based on metal carbides and nitrides. *Metally*, 2010, no. 5, pp. 39–51.
11. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Dubravina A.A., Semenov A.P. Structural features of diamond-like coatings with different alloying mechanisms and their tribological characteristics. *Fizika, khimiya i mekhanika tribosistem*, 2011, no. 10, pp. 147–152.
12. Kononov D.M., Zhdanov A.A., Morozov V.V. Production and study of diamond-like PVD coatings. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*, 2012, no. 6, pp. 275–278.
13. Muratore C., Jones D.R., Voevodin A.A. Smart tribological coating with wear sensing capability. *Wear*, 2008, vol. 265, pp. 913–920.
14. Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. MLBT, Air Force Research laboratory (US). *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 55, pp. 741–748.
15. Mehran Q.M., Fazal M.A., Razak B.A., Rubaiee S. A Critical Review on Physical Vapor Deposition Coatings Applied on Deferent Engine Components. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, 2018, vol. 43, no. 2, pp. 158–175.

Информация об авторах

Горлов Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Александров Денис Александрович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, профессор, admin@viam.ru

Черединов Павел Дмитриевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry S. Gorlov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis A. Aleksandrov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, professor admin@viam.ru

Pavel D. Cheredinov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.01.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 31.01.2025.