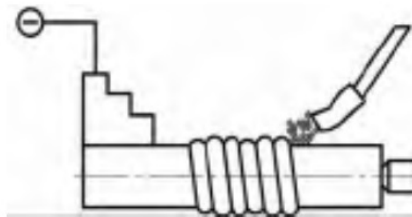


Научноёмкие технологии при ремонте, восстановлении деталей и нанесении покрытий



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 31-40.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 31-40.

Научная статья
УДК 621.793.14
doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-31-40

Технология получения вакуумных ионно-плазменных износостойких покрытий

Олег Вячеславович Кудряков¹, Д.Т.Н.
Валерий Николаевич Варавка², Д.Т.Н.

^{1,2} Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия
¹ kudryakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1462-4389>
² varavkavn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4703-7372>

Аннотация. Выполнен обзор технологии вакуумного ионно-плазменного (ВИП) напыления покрытий с позиций наукоёмкости, её критериев и методик оценки. Рассмотрены технологические особенности создания ВИП-покрытий, где подчеркивается, что процесс формирования покрытия на подложке происходит с участием одних из самых мощных сил в природе – сил межатомного взаимодействия. Это приводит к очень высокому уровню когезионной прочности покрытий, следствием которой является износостойкость и коррозионная стойкость. Методы исследования, диагностики и испытаний ВИП-покрытий, в силу особенностей их строения и свойств, включают, как правило, оборудование и методики ведущих мировых производителей в области электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, дифракционного анализа, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, непрерывного и динамического индентирования, стендовых испытаний уникальных свойств. Из опыта научно-практической деятельности авторов приведены примеры покрытий различной природы (нитридные, углеродные, металлокерамические), разной архитектуры (монослойные – однофазные, многослойные – 2D-композиции, дисперсные – 3D-композиции) и разнообразного назначения (износостойкие, триботехнические, антиэрозионные, термобарьерные). В частности, рассмотрены некоторые виды нитридных покрытий TiN, TiAlN, CrAlSiN, которые отличаются высокой твердостью $H \geq 24$ ГПа и абразивной износостойкостью. Однако в условиях относительно гладкого трения скольжения износостойкость сохраняет только многофазное наноструктурированное покрытие CrAlSiN. В условиях же каплеударной эрозии максимально высокую стойкость демонстрируют наноконпозиционные многослойные ВИП-покрытия состава TiN/MoN, которые конкурируют с признанным чемпионом в этой области – сварными пластинами стеллита ВЗК. При всем том, что толщина рассматриваемых в работе ВИП-покрытий является пленочной и составляет 1...10 мкм, тогда как пластины стеллита имеют толщину не менее 4 мм. В заключении отмечается, что ВИП-технология продолжает осваивать новые материалы, например, создавать алмазоподобные покрытия или покрытия из высокоэнтропийных сплавов. ВИП-технология соответствует высокому уровню наукоёмкости, а ВИП-покрытия перспективны для использования в машиностроении.

Ключевые слова: вакуумная ионно-плазменная технология, нитридные покрытия, наноконпозиции, механические свойства покрытий, трибологические испытания, износостойкость, наукоёмкость

Для цитирования: Кудряков О.В., Варавка В.Н. Технология получения вакуумных ионно-плазменных износостойких покрытий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 31–40.
doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-31-40

A pathway to vacuum ion-plasma wear-resistant coatings

Oleg V. Kudryakov¹, D. Eng.
Valery N. Varavka², D. Eng.

^{1,2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
¹ kudryakov@mail.ru
² varavkavn@gmail.com

Abstract. A review of the technologies of vacuum ion plasma (VIP) coating spraying based on the reasonability of science intensity, its criteria and evaluation methods is carried out. The technological features of producing VIP coatings are viewed with the emphasis on the process of coating formation on a substrate, which occurs under the impact of the most powerful forces in

nature, i.e. these are forces of interatomic interaction. This leads to a very high level of cohesive strength of the coatings, which results in wear resistance and corrosion resistance. This leads to a very high level of cohesive strength of the coatings, succeeding in wear and corrosion resistance. Methods of research, diagnosis and testing of VIP coatings, due to the peculiarities of their structure and properties, include, as a rule, equipment and techniques of leading world manufacturers in the field of electron microscopy, micro-röntgen spectral analysis, diffraction analysis, X-ray photoelectron spectrometry, continuous and dynamic indentation, bench testing of unique properties. With respect to scientific and practical activities of the authors, examples of coatings of various nature (nitride, carbon, metaloceramic), different architectures (monolayer – single-phase, multilayer – 2D composites, dispersed – 3D composites) and various applications (wear-resistant, tribotechnical, antierosion, thermal barrier) are given. In particular, some types of nitride coatings TiN, TiAlN, CrAlSiN, which are characterized by high hardness $H \geq 24$ GPa and abrasive wear resistance, are in the focus. However, in conditions of relatively smooth sliding friction, only the multiphase nanostructured CrAlSiN coating retains wear resistance. In conditions of drop-impact erosion, nanocompositional multilayer VIP coatings of TiN/MoN composition demonstrate the highest resistance, which compete with the recognized champion in this field - welded plates of stellite VZK (WCoCr). Despite the fact that the thickness of the VIP coatings viewed in the paper is a film of 1...10 microns, whereas the stellite plates have a thickness of at least 4 mm. In conclusion, it is noted that VIP technology continues to develop new materials, for example, to create diamond-like coatings or coatings made of high-entropy alloys. VIP technology corresponds to a high level of science intensity, and VIP coatings are promising for putting to use in mechanical engineering.

Keywords: vacuum ion-plasma technology, nitride coatings, nanocomposites, mechanical properties of coatings, tribological tests, wear resistance, science intensity

For citation: Kudryakov O.V., Varavka V.N. A pathway to vacuum ion-plasma wear-resistant coatings / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 31–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-31-40

Введение

В историческом контексте понятие наукоёмкости является довольно молодым. Тем не менее, к настоящему времени наукоёмкость и инновационность стали титульными характеристиками в оценке экономической составляющей и перспектив использования многих производственных технологий. В большой степени актуальность этой характеристики обусловлена её влиянием на добавленную стоимость продукции и, в конечном итоге, на обеспечение долгосрочной прибыльности и конкурентоспособности производства в целом и конкретной технологии в частности. Ученые, занимающиеся непосредственно совершенствованием самой технологии и улучшением функциональных характеристик её продукции, работают глубоко в недрах этой производственной системы и зачастую не имеют возможности оценить всю систему целиком, рассмотрев её «с птичьего полёта».

В связи с этим, целью настоящей работы является обзор технологии вакуумного ионно-плазменного (ВИП) напыления покрытий с позиций наукоёмкости, её критериев и методик оценки. Имея большой опыт работы в области создания функциональных ионно-плазменных покрытий, в настоящее время применяемых в теплоэнергетике, триботехнике, машиностроении [1 – 3], авторы полагают, что их взгляд на хорошо известную им область научных изысканий с новых позиций будет полезен и читателям, и самим авторам.

Критерии оценки наукоёмкости

Понятия, критерии и методики, связанные с наукоёмкостью, к настоящему моменту не стандартизированы и находятся в стадии обсуждения, обоснования гипотез, схематизации процессов, разработок классификаций и т. п. [4]. Так для количественной оценки наукоёмкости предприятий имеется целый ряд методик: отраслевая, кадровая, затратная (стоимостная), структурная, процессная, продуктовая (методика оценки нетрадиционности продукции), методика оценки интенсивности освоения технологий. Каждая из них включает разные по своему содержанию экономические показатели [5]. Их общим недостатком является отсутствие единого комплексного показателя оценки наукоёмкости. В самом общем виде качественный сравнительный анализ производственных отраслей по уровню наукоёмкости проводится по трем категориям:

1) наукоёмкая продукция должна обеспечивать производителю долгосрочные конкурентные преимущества за счет использования передовых достижений науки и техники, которые, в свою очередь, работают на создание добавленной стоимости, размер которой обязан значительно превышать производственные затраты; для количественной оценки этой категории существует несколько расчетных методик, которые экономисты продолжают обсуждать и совершенствовать;

2) уровень производственного процесса (или технологии), который определяется состоянием и возможностями материальной базы (или оборудования), уровнем организации,

включающим управление, логистику, автоматизацию, цифровизацию и т. д.;

3) кадровый потенциал, включающий научный, инженерно-технический и производственный персонал, к которому предъявляются требования высокой квалификации, способности научного и профессионального самосовершенствования и внедрения результатов НИОКР в производство.

Таким образом, рассматривая вопрос о наукоёмкости технологии получения вакуумных ионно-плазменных покрытий следует, на наш взгляд, прежде всего, отмежеваться от конкретных экономических методик оценки. Так, например, в рамках отраслевой методики мы можем получить принципиально разные значения показателя наукоёмкости технологии в зависимости от того, используется ли сформированное покрытие, к примеру, в аэрокосмической отрасли или в жилищно-коммунальной сфере, поскольку сами отрасли по показателю наукоёмкости, мягко говоря, существенно различаются. Поэтому целесообразно провести обзор ВИП-технологии, ориентируясь на приведенные выше категории:

– производственный процесс: оборудование, суть технологии, реализуемые физико-химические процессы;

– научное обеспечение: кадры; методы исследований, диагностики и испытаний покрытий; методики исследований, привлекаемые из смежных областей науки;

– продукция: ВИП-покрытия, их особенности строения и свойств.

Технология нанесения покрытий

В основе ионного осаждения покрытий из металлической плазмы в вакууме лежит процесс генерации металлической плазмы вакуумной дугой – сильноточным низковольтным разрядом, горящим в парах материала испаряемого электрода [6]. Для формирования ионно-плазменных покрытий используются вакуумные установки различных производителей. Среди ведущих компаний – Platit, Balzers, Ulvac, Isovac. Самым высоким современным требованиям отвечают вакуумные установки BRV (ГК «БелРосВак», Беларусь). Каждая установка отличается, прежде всего, методом активации (испарения) поверхностных атомов напыляемого материала: термический, дуговой, магнетронный, лазерный и др. Возможно сочетание нескольких методов в одной установке. При любом из них в рабочей камере установки поддерживается вакуум и тлеющий разряд. Эти условия способствуют созданию

металлической плазмы в камере, процесс ионизации в которой поддерживается благодаря напуску небольших содержаний инертного газа (чаще всего – аргона). С одной стороны, давление в камере должно быть низким, чтобы обеспечить чистоту плазмы и напыляемого покрытия. С другой стороны, высокий вакуум способствует затуханию электрической дуги и тлеющего разряда. Поэтому в течение технологического цикла давление в рабочей камере обычно находится в широких пределах $P = 0,01 \dots 5$ Па. Суть процесса в том, что на поверхности какого-либо металла (катода) атомы возбуждаются, ионизируются и испаряются.

Параллельно с этим в вакуумной камере установки создается электромагнитное поле с отрицательным зарядом на осаждаемой поверхности (изделии или образце), называемой подложкой. Отрицательный потенциал на подложке притягивает положительно заряженные ионы металлической плазмы и формирует плазменный поток, направленный к подложке, что и порождает процесс непрерывного осаждения покрытия на поверхности подложки. Таким образом формируются покрытия металлических систем. Если в вакуумной камере содержится какой-либо газ (называемый реакционным газом, в качестве которых используются азот, кислород, углеродсодержащий ацетилен или их смеси под низким давлением), то «по дороге» от катода к подложке ионы металла вступают в химическую реакцию и покрытие формируется в виде нитридных, оксидных, карбидных или смешанных соединений. Это уже покрытия другого класса – керамические или металлокерамические с совсем другими свойствами, чем металлические системы.

Важным здесь является то, что процесс формирования покрытия на подложке происходит с участием одних из самых мощных сил в природе – сил межатомного взаимодействия. Это приводит к очень высокому уровню когезионной прочности покрытий, следствием которой является износостойкость и коррозионная стойкость. Если подложка «правильно» подобрана под напыляемое покрытие и её поверхность качественно очищена (для этого вакуумные ионно-плазменные установки специально оснащаются ионными источниками), то и адгезионная прочность системы «покрытие-подложка» также имеет высокие значения, поскольку формируется на основе межатомных взаимодействий поверхностных атомов подложки и осаждаемых ионов покрытия. Для повышения адгезии покрытий за счет диффузионных процессов предусмотрен дополнительный нагрев подложки: при осаждении

металлических и нитридных покрытий – до 400...500 °С; при осаждении углеродных покрытий, например, алмазоподобных – до 200...250 °С.

Процесс нанесения ВИП-покрытий регулируется большим числом технологических параметров, общее количество которых может достигать двух десятков. К основным из них можно отнести – давление в камере, температуру, отклоняющее напряжение (на подложке), тока дуги, парциальное давление рабочего газа. Все эти параметры существенно изменяются на различных технологических стадиях работы вакуумной установки: откачка, нагрев, дегазация, напуск аргона, очистка подложки, травление поверхности подложки, нанесение покрытия, охлаждение, разгерметизация.

Одной из важных особенностей процесса нанесения ВИП-покрытий являются жесткие требования к качеству поверхности подложки. Так, например, шероховатость поверхности стальной подложки не должна быть ниже

10 класса чистоты ($Ra \leq 0,12$ мкм; $Rz \leq 0,6$ мкм) по ГОСТ 2789. Эти жесткие требования к технологии подготовки образцов диктуются современными мировыми стандартами производства изделий и узлов с ионно-вакуумными покрытиями для обеспечения высокой износостойкости. Несоблюдение этих норм ведет к искажениям решетки растущих кристаллитов покрытия, внутренним напряжениям и локальным деформациям в покрытии. Поскольку покрытие в точности воспроизводит рельеф поверхности подложки и сравнительно медленный рост покрытия осуществляется преимущественно в направлении, перпендикулярном к поверхности, то все неровности рельефа отражаются на структуре и конфигурации внешней поверхности покрытия. При разветвленном рельефе поверхности подложки в покрытии будут формироваться высокие внутренние напряжения, вызывающие растрескивание, расслоение или отслаивание покрытия.

Таким образом, технология вакуумного ионно-плазменного напыления покрытий является весьма затратной в силу:

- использования вакуумных систем;
- больших объемов рабочих камер, обеспечение вакуума в которых требует надежности и устойчивой работы многих систем установки;
- большого количества технологических параметров, значения которых влияют на конечный результат – качество и свойства покрытий;
- высокой энергоемкости почти всех стадий технологического процесса;

– дорогостоящих расходных материалов (изготовления испаряемых катодов из чистых металлов или их сложных композиций);

– необходимости высокой квалификации персонала, особенно на научно-исследовательской стадии отработки режимов получения экспериментальных и новых видов покрытий, когда для сотрудника желателен уровень кандидата наук;

– значительной длительности процесса напыления, поскольку скорость роста покрытия составляет 0,02...0,04 мкм/мин;

– высоких требований к качеству подготовки поверхности напыляемых изделий.

Методы исследований, диагностики и испытаний покрытий

Тонкие пленки и покрытия микрометровой или даже нанометровой толщины представляют собой весьма специфический объект, для исследования которого имеется достаточно ограниченный набор методов.

На приоритетное место уверенно можно поставить методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) высокого разрешения, которые дают результаты прямых наблюдений с дополнительными функциями, например, энергодисперсионного детектирования (ЭДА) химического состава. Главным недостатком этого метода является чрезмерная для российских потребителей стоимость оборудования ведущих производителей (JEOL, ZEISS, FEI). Но если такое оборудование в доступе имеется, оно открывает большие возможности благодаря нескольким видам детектируемого излучения: 1) низкоэнергетических вторичных электронов, формирующих основное топографическое изображение; 2) обратно рассеянных (отраженных) электронов, формирующих изображение в фазовом контрасте; 3) непрерывное рентгеновское излучение, дающее возможность детектировать химический состав; 4) характеристическое рентгеновское излучение; 5) вторичная флуоресценция (катодолюминисценция), возникающая за счет обоих видов рентгеновского излучения; 6) излучение оже-электронов, которое пока ещё не научились надежно детектировать в электронных микроскопах. При исследовании ионно-плазменных покрытий и тонких пленок подчас незаменимым инструментом становится двулучевой (электронный + ионный) СЭМ, например, ZEISS CrossBeam340, который позволяет прямо в вакуумной камере электронного микроскопа с помощью ионного пучка делать

кросс-секции произвольного контура на поверхности покрытия и с высокой точностью исследовать их поперечные сечения.

Ещё один современный метод детектирования химического состава покрытий и тонких пленок с расширенными функциями определения химических связей элементов (то есть это уже разновидность фазового анализа) – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Для получения этим методом распределения элементов по глубине покрытия можно послойно стравливать слои толщиной несколько нанометров. РФЭС – это метод очень тонкого исследования с детектированием Оже-электронов в сверхвысоком вакууме, дающий результаты высочайшей точности. Но всё-таки более надежные, чем на основе данных ЭДА или РФЭС, результаты фазового анализа покрытий получают с помощью инструментального исследования образцов на дифрактометрах (Bruker, XRD-Shimadzu, DX-Tescan, ДРОН, POWDIX, TD-Tongda и др.).

Для исследования физико-механических свойств покрытий в нано- и микромасштабе обычно применяется метод непрерывного индентирования, реализуемый в настоящее время целой линейкой нанотвердомеров самых разных производителей. Наиболее известное и почитаемое оборудование в этой области – измерительная платформа NanoTest 600 (производитель MicroMaterials, Ltd.), которая с большой точностью и в широком диапазоне нагрузок определяет модуль упругости E и твердость покрытий H в режиме непрерывного нагружения и разгрузки в соответствии с ГОСТ 8.748-2011. Помимо структурно зависимой твердости H и структурно независимого модуля упругости E , определяемых инструментально, для характеристики покрытий часто используются соотношения H/E и H^3/E^2 . Первое из них определяет сопротивление покрытий упругой деформации, а соотношение H^3/E^2 определяет сопротивление покрытий пластической деформации.

Очень важный показатель работоспособности покрытий, особенно трибологического назначения – адгезия. Это свойство наиболее строго определяется по методикам скрэтч-тестирования (царапания). Современные скрэтч-тестеры – многофункциональные высокоинформативные приборы: в результате одного испытания образца они выдают пять и более значений различных параметров, характеризующих адгезию покрытия: изменение нагрузки, силы и коэффициента трения, изменение глубины проникновения индентора и остаточной глубины (то есть за вычетом

упругого восстановления) царапины. Наиболее высокотехнологичные скрэтч-тестеры оснащены датчиками акустической эмиссии, позволяющими точно определять появление трещин и моменты скалывания покрытия.

Для изучения профиля рельефа поверхности покрытий и тонких пленок используется сканирующий атомно-силовой или туннельный зондовый микроскоп, который представляет результаты измерений в виде профилограмм или 3D-топографии поверхности. В силу высоких требований к качеству напыляемой поверхности, рельеф которой ионно-плазменное покрытие фактически копирует, этот метод анализа для ВИП-покрытий более важен на стадии подготовки поверхности покрываемой детали или образца, чем на стадии готового покрытия.

Для проведения лабораторных исследований трибологических характеристик покрытий на рынке предлагается большое количество трибометров и машин трения. Существуют международные методики DIN 50324-1992, DIN EN 1071-3, ASTM G99-2017 для проведения испытаний на трение, которые позволяют сопоставить результаты, полученные на различном оборудовании. Для антифрикционных и износостойких к трению покрытий трибологические испытания часто являются единственным источником информации об их функциональных и эксплуатационных свойствах. Довольно часто в специализированных лабораториях можно встретить, например, машину трения TRB (производитель Anton Paar Tritec), испытания на которой проводятся по схеме «штифт-пластина» либо при возвратно-поступательном движении пластины (образец с покрытием), либо при движении штифта по круговой траектории. Нормальное усилие на штифте (нагрузка трения F) варьируется в широких пределах, начиная со значения 1 Н. Контртело представляет собой закрепленный в штифте шарик диаметром 6,35 мм, изготовленный либо из электрокорунда Al_2O_3 , либо из кермета (твердого сплава) WC-Co. Основные определяемые трибологические параметры – коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца J и контртела J_K , а также (при круговом движении штифта) путь L , пройденный штифтом до разрушения покрытия.

В отношении функциональных свойств покрытий, помимо трибологических испытаний, авторы в своей практике работы с ионно-плазменными покрытиями сталкивались с такой ситуацией, когда испытательные стенды существуют, но доступ к ним весьма

ограничен. Например, испытания на каплеударную эрозию возможно в нашей стране провести только на специализированном стенде «Эрозия-М» (научно-производственный центр «Износостойкость» НИУ-МЭИ, Москва), который входит во Всероссийский реестр уникального оборудования. По результатам проведенных испытаний был получен не только комплекс уникальных данных об эрозионной стойкости покрытий, но и развита теория эрозионной стойкости материалов и покрытий различной природы при каплеударном воздействии, которая получила широкий публикационный отклик [7 – 10]. Причем, теория была создана с использованием данных, полученных авторами ранее в смежных областях технических наук – физике металлов, теорий диффузии и коррозионной стойкости [11 – 14]. Исследуемые нанокomпозиционные покрытия, в первую очередь, благодаря результатам стендовых испытаний, получили новое функциональное использование, весьма эффективное и с экономической точки зрения. Однако всё это стало возможным только благодаря финансированию исследований по гранту РФФИ. В контексте наукоёмкости это достаточно распространенная ситуация, когда создаваемые материалы или покрытия с новыми функциональными свойствами для определения сферы своего назначения требуют использования или даже создания испытательных стендов. Затраты на это составляют значительную долю НИОКР, которые являются одной из компонент показателя наукоёмкости.

Таким образом, представленные в настоящем разделе методики исследования состава, строения и свойств ионно-плазменных покрытий демонстрируют, что подобные объекты требуют применения современного высокотехнологичного (а потому и недешевого в использовании) диагностического и испытательного оборудования, полным набором которого обладает далеко не всякий научный центр в нашей стране. Возможно, у экономистов существуют надежные методики количественной оценки вклада этой составляющей в наукоёмкость технологии ВИП-покрытий, а на качественном уровне авторы оценили бы её как довольно высокую.

Особенности строения, свойств и применения ионно-плазменных покрытий

С точки зрения наукоёмкости результаты внедрения ВИП-покрытий должны оправдывать затраты на их создание и исследование, которые, как было показано, требуют

достаточно серьезных вложений в технологическое и научно-исследовательское сопровождение. В этом вопросе прослеживается тесная связь между перспективами применения ВИП-покрытий и наукоёмкостью ВИП-технологии. Для иллюстрации этого тезиса приведем лишь некоторые примеры исследования ВИП-покрытий, завершённые внедрением результатов в производство.

В практике своей научно-прикладной деятельности авторам довелось заниматься исследованием различных типов ВИП-покрытий:

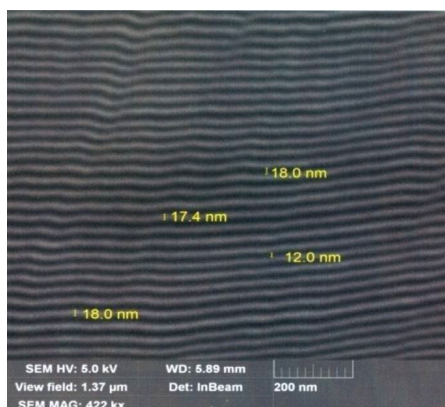
- по составу: металлических, в том числе металло-композиционных и высокоэнтропийных, нитридных, в том числе металлокерамических и композитных, углеродных, в том числе алмазоподобных (DLC) и комбинированных;

- по архитектуре (морфологии): многослойных (2D-композиты) и пространственно гетерофазных (3D-композиты);

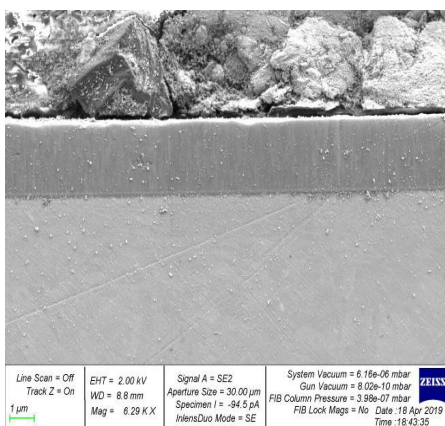
- по назначению: износостойких, триботехнических, антиэрозионных, термобарьерных.

Два вида ВИП-покрытий, принципиально отличных по морфологии и свойствам представлены на рис. 1. Многообразие структур покрытий, обеспечивает широкие возможности по варьированию их свойств, поскольку из приведенных выше физико-механических свойств (H ; E ; H/E и H^2/E^2) только модуль упругости является структурно независимым. Так, например, в процессе исследования эрозионной стойкости материалов и покрытий были получены результаты, которые позволили модернизировать технологию изготовления рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин, заменив дорогостоящие сварные пластины из твердого сплава стеллита ВЗК на композиционные металлокерамические ВИП-покрытия.

Сравнительные данные для стали 20Х13, титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1, стеллита ВЗК и нанокomпозиционных многослойных покрытий приведены на рис. 2, где в качестве антиэрозионного показателя использованы экспериментально определенные значения продолжительности инкубационного периода t_0 материалов и покрытий (до появления первых признаков разрушения), полученные в идентичных условиях стендовых испытаний. Таким образом, несмотря на то, что ВИП-покрытия нитридных систем давно и активно изучаются, для их нанокomпозиционной морфологии удалось найти новую сферу эффективного использования – защита от каплеударной эрозии.



а)



б)

Рис. 1. Морфология ВИП-покрытий на стальной подложке в поперечном сечении, СЭМ:

а – металокерамическое 2D-нанокompозитное покрытие системы TiN/Ti; б – однослойное нитридное покрытие TiAlN

Fig. 1. Morphology of VIP coatings on a steel substrate in cross section, SEM:

а – metal-ceramic 2D nanocomposite coating of the TiN/Ti system; б – single-layer nitride coating TiAlN



Рис. 2. Сравнительная эрозионная стойкость типичных лопаточных материалов (20X13; BT6; BT3-1; ВЗК) и нанокompозитных ВИП-покрытий различных систем по результатам стендовых испытаний на каплеударную эрозию

Fig. 2. Comparative erosion resistance of typical blade materials (20X13; W6; W3-1; In3K) and nanocomposite VIP coatings of various systems based on the results of bench tests for impact erosion

Приведем ещё один пример выполненных полноформатных исследований ВИП-покрытий, предназначенных для повышения трибологических характеристик нагруженных узлов трения (в частности, используемых в трансмиссии вертолетов). В табл. 1 представлены среднестатистические результаты измерения механических и трибологических характеристик исследованных покрытий, в том числе – коэффициента трения μ , относительных значений объёмного износа J и J_K в расчете на нагрузку F и путь L трения, полученных при испытаниях на машине трения.

1. Механические и трибологические свойства исследованных покрытий [2]

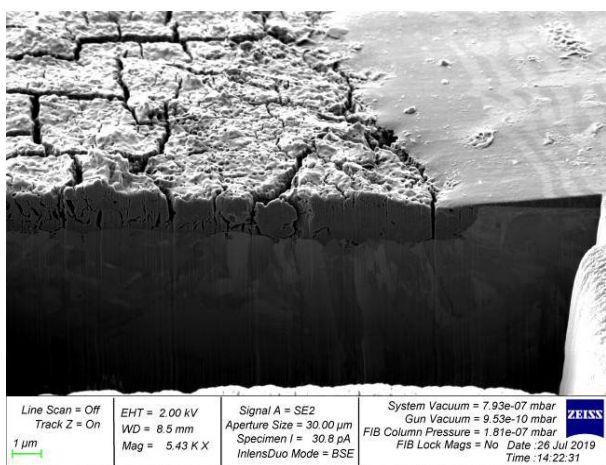
1. Mechanical and tribological properties of the studied coatings [2]

Характеристика образцов	Механические свойства		Трибологические свойства		
	H , ГПа	E , ГПа	μ	J , 10^{-7} мм ³ /Н/м	J_K , 10^{-7} мм ³ /Н/м
Подложка (цементованная сталь 12X2H4A без покрытия)	6,4	206,0	0,902	12,3	4,46
Монослойное покрытие TiAlN	25,5	316,1	0,756	12,91	4,79
Многослойное покрытие TiAlN	25,1	257,7	0,722	10,6	4,64
Наноструктурированное покрытие CrAlSiN	24,1	251,3	0,820	0,792	1,66
Алмазоподобное покрытие (DLC)	32,3	203,8	0,330	3,88	0,91

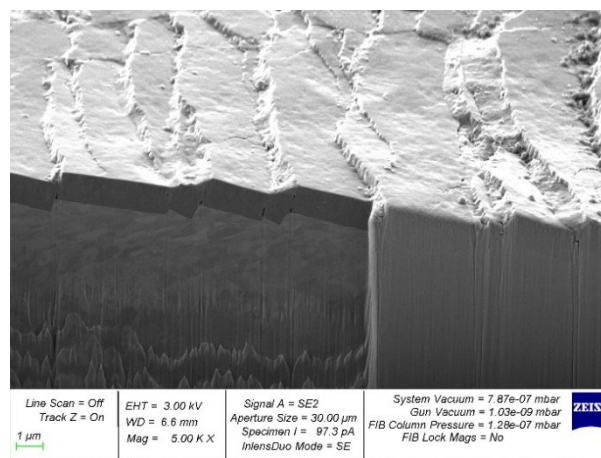
Из приведенных данных (см. табл. 1) следует, что механические свойства не определяют износостойкость ВИП-покрытий при испытаниях на трение скольжения. Поэтому задача оптимизации выбора покрытия потребовала исследования механизма изнашивания покрытий, который у исследованных покрытий оказался существенно различным. Так, покрытия TiAlN в условиях проведенных трибоиспытаний были подвержены окислительно-механическому износу (рис. 3, а), что с учетом их относительно невысокой стойкости к оксидированию и определило их низкую износостойкость.

В процессе изнашивания покрытия системы CrAlSiN окисления не наблюдалось (в связи с его более высокой стойкостью к оксидированию). Разрушение покрытия происходило с образованием трещин в дорожке трения, расположенных поперёк дорожки и нормально к поверхности покрытия. Далее

наблюдалась стадия ступенчатой фрагментации (рис. 3, б) в виде упорядоченного сдвига берегов образовавшихся трещин. Под воздействием движущегося шарика-штифта машины трения деформация фрагментированного покрытия происходит согласованно – фрагменты покрытия поворачиваются относительно подложки на одинаковый, относительно небольшой угол ($5 \dots 15^\circ$), образуя ступенчатую конфигурацию покрытия. Причем, в процессе ступенчатой фрагментации сохраняется целостность, как покрытия, так и границы «подложка-покрытие», т. е. покрытие сохраняет свою работоспособность, а период сопротивления покрытия разрушению и выкрашиванию (т.е. износостойкость), благодаря этому, возрастает. Принципиально другой механизм изнашивания обнаружен у углеродных DLC-покрытий, износ которых происходит по принципу истирания подобно высокопрочным резинам.



а)



б)

Рис. 3. Механизмы изнашивания ВИП-покрытий при трибологических испытаниях на трение скольжения, СЭМ, кросс-секции:

а – окислительный износ (разгарные трещины) покрытия TiAlN; б – стадия ступенчатой фрагментации в процессе изнашивании покрытия CrAlSiN

Fig. 3. Mechanisms of wear of VIP coatings subjected to tribological tests for sliding friction, SEM, cross sections: a – oxidative wear (incandescent cracks) of the TiAlN coating; b – the stage of stepwise fragmentation during the wear of the CrAlSiN coating

В целом же следует отметить, что ВИП-технология путем варьирования технологических параметров обеспечивает возможность регулирования свойств покрытий в широком диапазоне, изменяя их элементный состав, фазовое состояние, микроструктуру и морфологию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры завершенных комплексов исследования ВИП-покрытий определенного функционального назначения – лишь небольшая часть возможностей ВИП-технологии. Перспективы технологии

ограничиваются только дальностью и шириной полета фантазии исследователей, поскольку число комбинаций компонентов в составе покрытия практически не ограничено, особенно при магнетронном способе испарения. Так, например, авторы работы [15] апробировали высокоэнтропийный сплав эквиатомного состава с двадцатью компонентами.

Сделанный всесторонний обзор вакуумной ионно-плазменной технологии нанесения покрытий дает основания читателю самому оценить уровень и перспективы наукоёмкости этой технологии. Авторы же полагают, что сам принцип использования покрытий на относительно малой площади поверхности изделия, обеспечивающий длительные преимущества этому изделию по работоспособности над аналогичными изделиями без покрытий, гарантирует актуальность и перспективы применения технологий получения покрытий независимо от методик расчета и значений коэффициента наукоёмкости. Что же касается технологии вакуумного ионно-плазменного напыления, то её высокий уровень наукоёмкости не вызывает сомнений хотя бы потому, что в этом технологическом процессе человек вторгается в область использования одних из самых мощных сил в природе – сил межатомного взаимодействия, на основе которых формируется покрытие с уникальными свойствами. Проникновение же в недра природы, будь то наномир или далекий космос, волей-неволей требует высокого технологического уровня, высококвалифицированных кадров, надежного современного оборудования (технологического, аналитического, испытательного) и, соответственно, немалых капитальных затрат.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Мониторинг начальных стадий эрозионного износа ионно-плазменных покрытий при каплеударном воздействии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 10 (94). С. 40–47.
2. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabiya I.Yu., Novikov E.S., Manturov D.S. Structural aspects of wear resistance of coatings deposited by physical vapor deposition // Phys. Mesomech. 23(6), 570–583 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1029959920060132>
3. Kolesnikov V.I., Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., Danilchenko S., Manturov D., Novikov E., Kudryakov O.V., Guda S.A., Soldatov A.V.,

Kolesnikov I.V. Design of double layer protective coatings: Finite element modeling and machine learning approximations // ACTA Astronautica, 204, 869–877 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.007>

4. Batkovsky A.M., Fomina A.V., Semenova E.G., Khrustalev E.Yu., Khrustalev O.E. Models and Methods for Evaluating Operational and Financial Reliability of High-Tech Enterprises. Journal of Applied Economic Sciences. 2016. V. 11. No 7. P. 1384–1394.

5. Абрашкин М.С. Методика оценки наукоёмкости предприятий ракетно-космического машиностроения // Организатор производства. 2018. Т. 26. № 3. С. 74–84. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-3-74-84

6. Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М., Спектор В.С. Вакуумная ионно-плазменная обработка. М.: ИНФРА-М, 2014. 160 с.

7. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Прочность и механизмы разрушения высокопластичных материалов при воздействии дискретного водно-капельного потока // Вестник ДГТУ. 2011. Т.11. № 8 (59). Вып. 2. С. 1376–1384.

8. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 1 // Материаловедение. 2012. № 5. С. 36–43.

9. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 2 // Материаловедение. 2012. №6. С. 14–19.

10. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Особенности разрушения металлических сплавов в условиях устойчивой каплеударной эрозии // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 3 (167). С. 45–50.

11. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Феноменология мартенситного превращения и структуры стали. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2004. 200 с.

12. Сапунов С.Ю., Кудряков О.В., Фаргушный Н.И. Строение и свойства никель-цинкового покрытия на стали // Сталь. 2003. № 11. С. 94–96.

13. Кудряков О.В. Дислокационные квазидиполи и их роль в мартенситном превращении стали // Физика металлов и материаловедение. 2002. Т. 94. № 5. С. 3–10.

14. Кудряков О.В., Пустовойт В.Н. Структурный критерий коррозионной стойкости «белых слоев» // Материаловедение. 1998. №7. С. 33–39.

15. Fang C.M., Cantor B. An Equiatomic 20-Element High Entropy Amorphous Alloy: Ab Initio Molecular Dynamics Investigations / Posted Date: 19 February 2024. DOI: 10.20944/preprints202402.1010.v1

REFERENCES

1. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Monitoring of initial stages of erosive wear of ion-plasma coatings at droplet-shock impacts // Strengthening technologies and coatings, 2012, no. 10, pp. 40–47.
2. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabiya I.Yu., Novikov E.S., Manturov D.S. Structural aspects of wear

resistance of coatings deposited by physical vapor deposition // Phys. Mesomech. 23(6), 570–583 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1029959920060132>

3. Kolesnikov V.I., Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., Danilchenko S., Manturov D., Novikov E., Kudryakov O.V., Guda S.A., Soldatov A.V., Kolesnikov I.V. Design of double layer protective coatings: Finite element modeling and machine learning approximations // ACTA Astronautica, 204, 869–877 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.actastro.2022.11.007>

4. Batkovsky A.M., Fomina A.V., Semenova E.G., Khrustalev E.Yu., Khrustalev O.E. Models and Methods for Evaluating Operational and Financial Reliability of High-Tech Enterprises. Journal of Applied Economic Sciences. 2016. V. 11. No 7. P. 1384–1394.

5. Abrashkin M. S. Methodology for assessing the science intensity of rocket and space engineering enterprises. Organizer of Production, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 74–84. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-3-74-84.

6. Ilyin A.A., Plekhanov V.V., Petrov L.M., Spector V.S. Vacuum ion-plasma treatment. Moscow: INFRA-M, 2014. 160 p.

7. Varavka V.N., Kudryakov O.V. Strength and high-plasticity materials fracture mechanisms under discrete water-droplet flow // Bulletin of the DSTU. 2011, vol.11, no. 8 (59). Issue2, pp. 1376–1384.

8. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Mechanisms of generation of erosive wear of metallic materials under high-

speed drip collisions: Part 1// Materialovedenie. 2012, no. 5, pp. 36-43.

9. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Mechanisms of generation of erosive wear of metallic materials under high-speed drip collisions: Part 2// Materialovedenie. 2012, no. 6, pp. 14–19.

10. Varavka V.N., Kudryakov O.V. Features of destruction of metal alloys in the conditions of steady droplet-shack erosion. University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2012, no. 3, pp. 45–50

11. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Phenomenology of martensitic transformation and steel structure. Rostov-on-Don: Publishing Center of DSTU, 2004. 200 p.

12. Sapunov S.Yu., Kudryakov O.V., Fartushny N.I. Structure and properties of nickel-zinc coating on steel // Stal', 2003, no. 11, pp. 94–96.

13. Kudryakov O.V. Dislocation quasi-dipoles and their possible role in martensitic transformations in steel // Physics of metals and metallurgy. 2002, vol. 94, no. 5, pp. 3–10.

14. Kudryakov O.V., Pustovoit V.N. Structural criterion of corrosion resistance of «white layers» // Materialovedenie. 1998, no.7, pp. 33–39.

15. Fang C.M., Cantor B. An Equiatomic 20-Element High Entropy Amorphous Alloy: Ab Initio Molecular Dynamics Investigations / Posted Date: 19 February 2024. DOI: 10.20944/preprints202402.1010.v1

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 08.04.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024; принята к публикации 23.04.2024.

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 17.04.2024; accepted for publication 23.04.2024.