

THE EFFECT OF THE STRUCTURAL PARAMETERS OF MULTILAYER ION-PLASMA PVD COATINGS ON THEIR STRENGTH AND WEAR RESISTANCE*Konstantin Sergeevich Selivanov*

Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076, Ufa, Russia

^a K.Selivanov@mail.ru

ABSTRACT

This study presents a methodology for investigating the mechanical properties of multilayer ion-plasma coatings by scratch testing. The approach includes constructing contact pressure versus load dependencies for a hemispherical diamond indenter, determining the maximum contact pressure, and identifying the critical failure loads. The results of microscopic analysis of the coatings and their failure modes are reported, along with measurements of microhardness (HV) and relative wear resistance under gas-abrasive wear conditions, performed in accordance with GOST 23.201–78. Based on the experimental data, correlations were established between strength and wear resistance characteristics and the structural parameters of the coatings, material composition, thickness, and number of layers. A critical (minimum required) thickness of nitride layers was identified at which the resistance of the coatings to brittle failure increases significantly (up to 2.5 times). It is proposed that multilayer ion-plasma coatings enhance wear resistance via two mechanisms: providing resistance to the formation of primary (nucleation) microcracks and suppressing their propagation at the interfaces between metallic and nitride layers. The obtained results can be recommended for the design of multilayer coatings based on titanium, vanadium, and their nitrides, intended to reinforce titanium alloy components, compressor blades of stationary gas and steam turbines.

KEYWORDS

Multilayer coatings; surface; strength; wear resistance; fracture; contact load; gas-abrasive wear.

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ИХ ПРОЧНОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ***Константин Сергеевич Селиванов*

Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди 32, 450076, Уфа, Россия

^a K.Selivanov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В работе изложена методика исследования механических свойств многослойных ионно-плазменных покрытий царапанием (scratch test), включающая в себя построение зависимостей контактного давления от нагрузки на полусферический алмазный индентор, определение максимального контактного давления и критических нагрузок разрушения. Приведены резуль-

таты микроскопического исследования покрытий и характера их разрушения, определены величины микротвердости (HV) и относительной износостойкости при газоабразивном изнашивании по методике ГОСТ 23.201–78. На основе экспериментальных данных установлена связь характеристик прочности и износостойкости с параметрами конструкции покрытия: составом материалов, толщиной и количеством слоев. Определена критическая (минимально необходимая) толщина нитридных слоев, при которой достигается значительное (до 2,5 раз) повышение стойкости исследуемых покрытий к хрупкому разрушению. Сделано предположение, что многослойные ионно-плазменные покрытия одновременно реализуют два механизма повышения износостойкости: сопротивление к образованию первичных (зародышевых) микротрещин и сдерживание их развития на границах металлических и нитридных слоев. Полученные результаты могут быть использованы при выборе конструкции многослойных покрытий на основе титана, ванадия и их нитридов для упрочнения деталей из титановых сплавов, в частности рабочих лопаток компрессора стационарных газотурбинных установок и паровых турбин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Многослойные покрытия; поверхность; прочность; износостойкость; разрушение; контактная нагрузка; газоабразивный износ.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития топливно-энергетического комплекса России в средне и долгосрочной перспективе является разработка новых материалов, в том числе функциональных покрытий с особыми свойствами: износостойких, антикоррозионных, адгезивных и других [1, 2]. Разработка новых материалов, покрытий и технологий их нанесения наиболее актуальна и востребована при производстве особо ответственных и самых массовых деталей энергогенерирующего оборудования – рабочих и направляющих лопаток паровых и газовых турбин. Лопаточный аппарат является одним из наиболее напряженных узлов газоперекачивающих агрегатов, газовых и паровых турбин электрических станций [4–6], в значительной степени определяющим экономичность, надежность и долговечность эксплуатации этих изделий. Рабочие и направляющие лопатки работают в экстремальных условиях сложного напряженно-деформированного состояния, ударных и вибрационных нагрузок. Основными причинами их преждевременного разрушения являются разупрочнение материала, появление поверхностных концентраторов напряжения в виде следов износа, царапин, забоин и др.,

приводящих к ускоренному усталостному разрушению. Существующие требования к повышению долговечности и надежности работы лопаточного аппарата обуславливают необходимость разработки и постоянного совершенствования новых способов упрочнения и нанесения износостойких покрытий.

Наиболее перспективными методами формирования защитных покрытий в настоящее время являются процессы вакуумного ионно-плазменного осаждения из низкотемпературной плазмы [3–9]. Этими методами наносят металлические и высокотвердые карбидные, нитридные, оксидные, оксикарбидные и др. покрытия в самом широком диапазоне физико-химических свойств, определяемых их структурой и сочетанием используемых материалов. Нанесенные ионно-плазменные покрытия являются плотными, практически лишенными пор, равномерными по своему составу и имеют высокую адгезию к поверхности на деталях сложной конфигурации.

Современные вакуумные технологии и оборудование для нанесения ионно-плазменных покрытий позволяют одновременно использовать несколько ионных источников для обработки деталей [10–15]. Это дает возможность формировать многослойные по-

крытия на лопатках турбомашин с заданной конструкцией (составом материалов, толщиной и количеством слоев). В статье исследуется взаимосвязь конструкции таких покрытий с их прочностными характеристиками и износостойкостью с целью обеспечения долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов в условиях эксплуатации.

1. Методики исследований

Исследования проводили на образцах $\text{Ø}25 \times 5$ мм из двухфазного $\alpha + \beta$ -титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), широко применяемого для изготовления лопаток газовых и паровых турбин. Перед упрочнением образцы проходили термическую обработку для снятия внутренних напряжений (нагрев в аргоне до температуры 500 ± 20 °С, выдержка 2 часа, охлаждение вместе с печью) и полирование абразивными войлочными кругами до шероховатости Ra 0,4–0,8.

Упрочняющую обработку выполняли в одном технологическом цикле, включающем в себя ионную очистку, ионное легирование (модификацию поверхности ионами азота) и нанесение многослойных ионно-плазменных покрытий на основе ванадия, титана и их нитридов. Температура нагрева образцов не превышала 450 ± 20 °С. Для упрочнения и нанесения покрытий использовали вакуумную установку «Ватт-900-3Д» с протяженными электродуговыми испарителями и планетарным механизмом вращения образцов. Для формирования покрытий использовали катоды из титановых сплавов ВТ1-0 ОСТ 1 90024-71, ВТ20 ОСТ1 90013-71 и ванадиевого сплава ВнМ-1 ТУ 48-4-272-73.

Микротвердость покрытий исследовали на микротвердомере ПМТ-3 алмазными наконечниками типа Виккерс при нагрузках от 50 гс. Проводили не менее пяти измерений, после чего результат усредняли.

Исследование толщины покрытия проводили с помощью системы анализа изображения Thixomet на световом оптическом микроскопе Nikon MA100 при увеличении от 50 до $500\times$. Для анализа толщины и структуры покрытия изготавливали сферические

шлифы на приборе «CSM Calotest». Результаты исследований приведены в табл. 1 и 2.

Испытания стойкости к газоабразивному износу различных вариантов покрытий выполняли по методике ГОСТ 23.201–78 на центробежном стенде ООО «НПП УАСТ». Результаты испытания приведены в работе [16]. Величину относительной износостойкости рассчитывали по формуле:

$$\xi = \Delta m_{\text{исх}} \cdot \rho / (\Delta m \cdot \rho_{\text{исх}}), \quad (1)$$

где $\Delta m_{\text{исх}}$, г – потеря массы образца без покрытия; Δm , г – потеря массы образца с покрытием в граммах; ρ , г/см³ – плотность испытываемого материала; $\rho_{\text{исх}}$ – плотность исходного материала образца.

Полученные величины относительной износостойкости приведены в табл. 1 и 2.

Для исследования механических свойств покрытий использовали методику инструментального индентирования алмазными наконечниками [17, 18]. Испытания проводили на установке «CSM Scratch Tester» алмазным (модуль Юнга $E = 1147$ ГПа) полусферическими наконечником типа Роквелл с радиусом 20 мкм и углом при вершине 120°. Диапазон прикладываемых нагрузок бы установлен в пределах от 0,3 до 30 Н, скорость приложения нагрузки – 10 Н/мин. В процессе испытания проводили автоматическую запись величин нормальной нагрузки, действующей на индентор (F_N , Н), глубины проникновения индентора в материал (P_d , мкм) и сигнала акустической эмиссии (A_s , дБ).

2. Экспериментальная часть

Для исследования механических свойств было сформировано несколько вариантов покрытий, различающиеся составом материалов, толщиной и количеством слоев. При выборе конструкции покрытий толщину нитридных слоев (h_N) выбирали из диапазона: 0,5; 2; 3; 6 мкм – при постоянной толщине промежуточных металлических слоев $h_{\text{V,Ti}} \approx 0,5$ мкм. Количество слоев (n) изменяли от 2 до 46 при суммарной толщине покрытия

(h) не более 15 мкм. Фактические значения параметров конструкции покрытий приведены в табл. 1 и 2.

Металлографические исследования показали, что сформированные ионно-плазменные покрытия обладают плотной структурой в виде чередующихся слоев металлов (Ti, V) и их нитридов без видимой пористости и возможных дефектов в виде расслаиваний или сколов. В структуре покрытия наблюдаются светлые сферические микрочастицы α -титана с размерами до 1 мкм, известные как «капельная фаза» [19, 20], сопутствующая процессу нанесения ионно-плазменных покрытий электродуговыми испарителями.

В качестве примера на рис. 1, а, б показано восьмислойное покрытие нитрида титана толщиной $\approx 12,5$ мкм.

Исследованные покрытия плотно прилегают к основному материалу подложки, титановому сплаву ВТ6, без видимых отслоений и вспучиваний. Микроструктура материала подложки типичная для двухфазных титановых сплавов и представляет собой совокупность α и $\alpha+\beta$ зерен. Средний размер α зерен составляет около 10–12 мкм, $\alpha+\beta$ зерен – 12–15 мкм. Изменений в микроструктуре поверхности подложки, вследствие нагрева при нанесении покрытия не наблюдается, рис. 1, в.

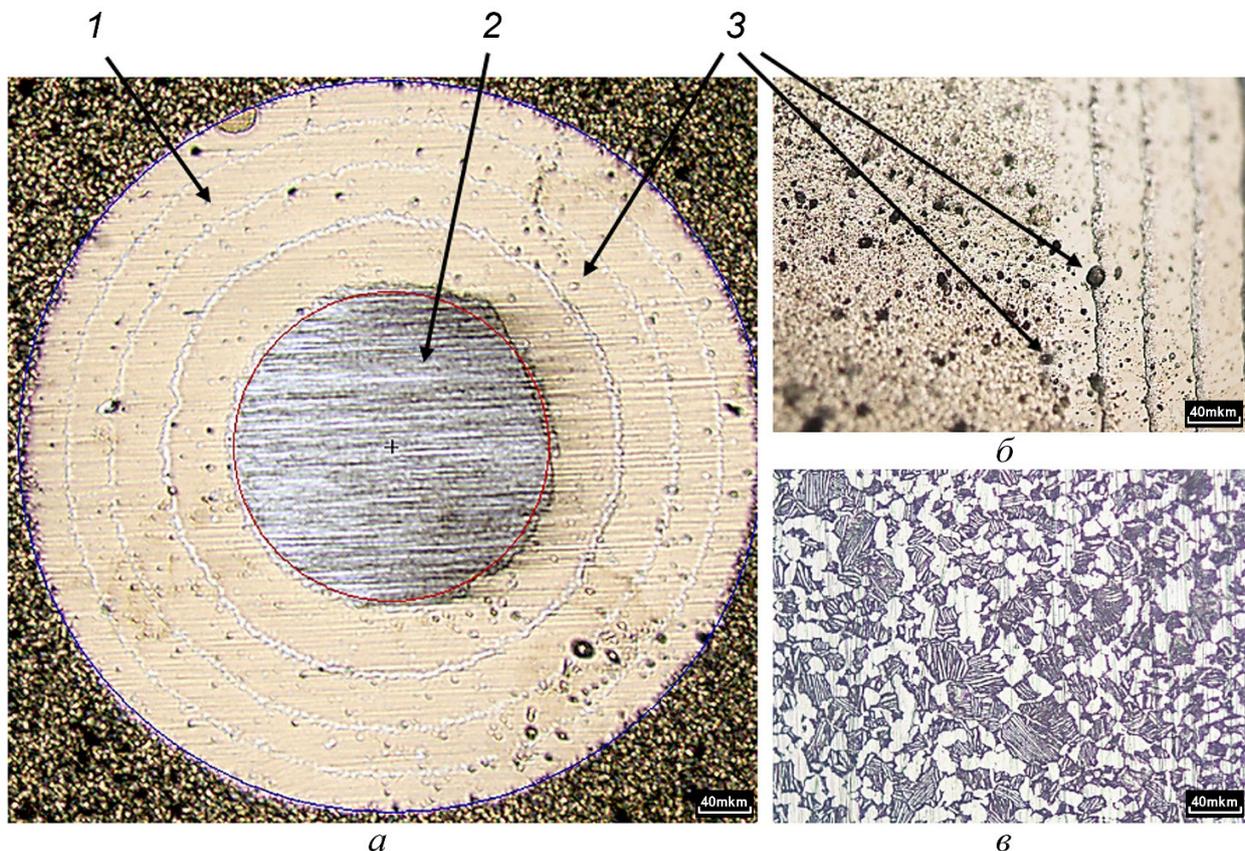


Рис. 1. Шлиф к поверхности образца с восьмислойным покрытием Ti + TiN, $h = 12,5 \pm 1,3$ мкм (200 \times):
 а – сферический шлиф; б – наклонный шлиф; в – микроструктура материала подложки (титановый $\alpha+\beta$ -сплав ВТ6) после нанесения покрытия; 1 – многослойное покрытие; 2 – материал подложки; 3 – «капельная фаза» α -Ti

Fig. 1. Cross-section of the sample surface with an eight-layer Ti + TiN coating, $h = 12.5 \pm 1.3$ μm (200 \times):
 а – spherical cross-section; б – inclined cross-section; в – microstructure of the substrate material (titanium alloy VT6) after coating deposition; 1 – multilayer coating; 2 – substrate material; 3 – droplet phase of α -Ti

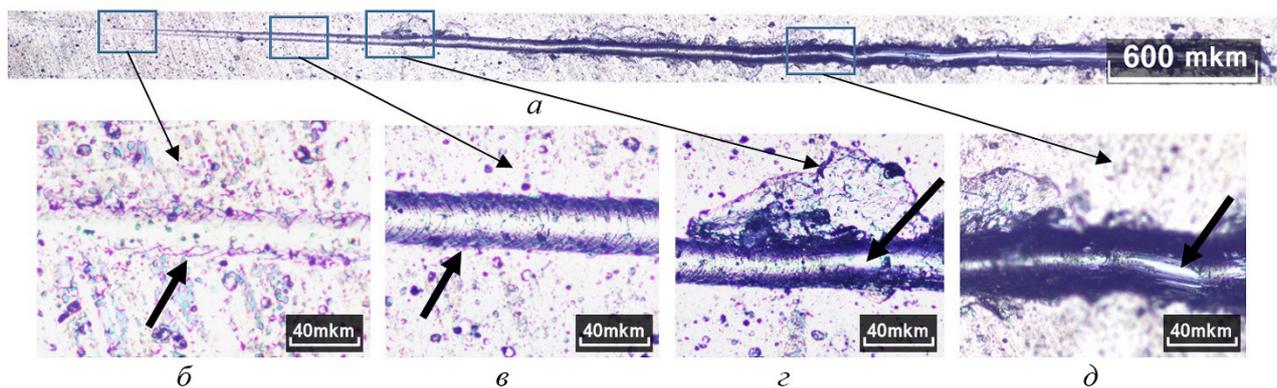


Рис. 2. Царапины, возникающие при испытании материала поверхности на прочность: *а* – царапина; *б* – начало области пластической деформации, образование первых трещин; *в* – кольцевые трещины по всей деформированной поверхности; *г* – образование первого хрупкого скола или отслоения покрытия при нагрузке L_{C1} ; *д* – место полного удаления покрытия с подложки при нагрузке L_{C2} . Стрелками показаны места разрушения

Fig. 2. Evolution of coating damage during scratch testing for adhesion strength: *a* – single scratch; *б* – initial stage of plastic deformation with formation of first cracks; *в* – development of circular cracks across the entire deformed surface; *г* – appearance of the first brittle spallation or coating delamination at the critical load L_{C1} ; *д* – area of complete coating removal from the substrate at the critical load L_{C2} . Damage locations are indicated by bold arrows

Исследование механических свойств многослойных покрытий проводили на установке «CSM Scratch Tester». При испытаниях исследуемое покрытие подвергали царапанию полусферическим алмазным индентором при непрерывно увеличиваемой нагрузке от 0,3 до 30 Н. На образующейся царапине (рис. 2) условно выделяли три характерные области. Первая, область упругих деформаций, характеризуемая полным восстановлением деформированного материала без следов его разрушения и образования поверхностных дефектов. По мере увеличения нагрузки на индентор, на поверхности возникала вторая область упругопластических деформаций, характеризуемая образованием единичных дефектов в виде кольцевых герцевских трещин (рис. 2, б). С ростом нагрузки отдельные трещины объединялись в более протяженные, распространявшиеся в направлении движения индентора под углом $\approx 45^\circ$ к царапине (рис. 2, в). В некоторый момент времени, при достижении критической нагрузки L_{C1} , возникала третья область с

визуально наблюдаемыми разрушениями в виде хрупких сколов (рис. 2, г). При достижении нагрузки L_{C2} происходило полное разрушение покрытия до материала подложки (рис. 2, д). Таким образом, для каждого варианта покрытия были определены критические нагрузки начала разрушения (L_{C1} , Н) и полного удаления покрытия с подложки (L_{C2} , Н). Величины критических нагрузок исследованных покрытий приведены в табл. 1 и 2.

На основании полученных экспериментальных данных, используя известные формулы механики контактного взаимодействия [21], было рассчитано давление в месте контакта индентора и материала поверхности:

$$p_0 = \frac{3}{2} p_{cp} = \frac{3}{2} \frac{F_N}{\pi a^2}, \quad (1)$$

где p_{cp} – среднее давление в контакте, МПа; F_N – нормальная сила в момент разрушения ($F_N \equiv L_{C2}$), Н; a – радиус невосстановленного пятна контакта индентора:

$$a = \sqrt{Rd}, \text{ мм}^2, \quad (2)$$

где R – радиус индентора, мм; d – глубина проникновения индентора в материал поверхности, при упругом контакте примерно равна половине глубины индентирования P_{d^*} мм.

На основании положений механики контактного взаимодействия (задача Герца) имеем:

$$F_N = \frac{4}{3} E^* \sqrt{Rd^3}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где E^* – эквивалентный модуль упругости, МПа, зависящий от упругих свойств контактируемых материалов следующим образом:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \text{ МПа}^{-1}, \quad (4)$$

где $E_{1,2}$ – модули Юнга контактируемых материалов соответственно, МПа; $\nu_{1,2}$ – коэффициенты Пуассона контактирующих материалов соответственно.

По результатам расчетов для каждого варианта покрытия были построены зависимости изменения контактного давления от прилагаемой нагрузки (рис. 3) и определены величины максимального контактного давления (p_{\max}), приведенные в табл. 1 и 2.

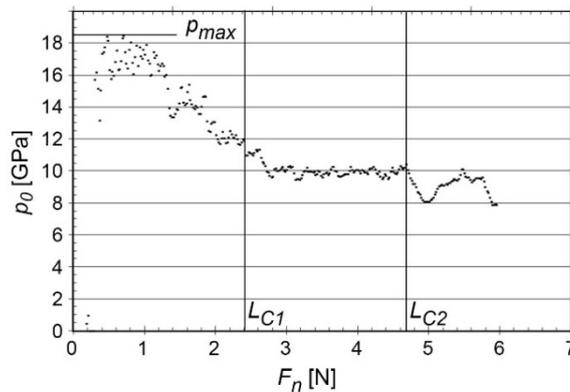


Рис. 3. Пример изменения контактного давления от прилагаемой нормальной нагрузки на индентор (Роквелл, $R = 20$ мкм), десятислойное покрытие Ti + TiN, $h = 14,9$ мкм

Fig. 3. Example of contact pressure variation as a function of applied normal load on a Rockwell indenter ($R = 20 \mu\text{m}$), ten-layer Ti + TiN coating, thickness $h = 14.9 \mu\text{m}$

Таблица 1. Свойства многослойных покрытий Ti + TiN

Table 1. Properties of the multilayered PVD coatings Ti + TiN

n	h [mkm]	h_N [mkm]	HV _{0,05}	p_{\max} [GPa]	L_{C1} [N]	L_{C2} [N]	ξ
2	3,6±0,5	2,5±0,2	1850±225	7,8	2,9	3,2	3,7
2	6,2±0,5	5,6±0,2	1950±235	11,1	4,2	5,9	5,5
4	6,7±0,4	3,0±0,8	2157±203	12,5	3,5	5,2	3,8
4	11,2±1,5	5,5±0,2	2470±174	16,5	4,5	6,1	5,0
8	12,5±1,3	2,5±0,5	1800±167	19,2	2,1	4,7	2,7
10	14,9±2,5	2,5±0,6	2970±199	18,4	2,4	4,7	4,9
16	5,5±0,5	0,5±0,2	2650±275	9,1	1,6	11,1	1,5
36	10,8±1,2	0,5±0,2	2280±183	14,6	1,7	8,6	1,2
46	13,8±1,2	0,3±0,2	2140±177	16,7	1,5	7,1	1,1

Примечание – толщина титановых слоев $h_{Ti} = 0,5 \pm 0,2$ мкм

Note – thickness of individual titanium layers: $h_{Ti} = 0.5 \pm 0.2 \mu\text{m}$

Таблица 2. Свойства многослойных покрытий (V, Ti) + (V, Ti)N**Table 2.** Properties of the multilayered PVD coatings (V, Ti) + (V, Ti)N

n	h [mkm]	h_N [mkm]	HV _{0,05}	p_{max} [GPa]	L_{CI} [N]	L_{C2} [N]	ξ
4	5,3±1,0	3,5±0,2	1905±280	13,2	3,6	11,5	9,8
4	6,2±1,0	2,5±0,2	1810±281	14,8	4,1	7,1	11,7
4	6,4±1,0	3,5±0,2	2169±276	14,8	3,2	7,6	12,4
4	7,1±1,5	3,5±0,2	2005±185	15,1	5,6	13,2	5,1
4	7,8±1,5	2,5±0,2	1734±203	13	7,5	15,4	5,7
6	9,7±1,5	2,5±0,8	2256±203	21,7	5,2	8,7	9,3
36	11,4±1,5	0,5±0,2	2126±178	18,3	2,4	15,2	2,5
10	10,9±1,5	2,5±0,7	2220±185	24,6	3,2	10,1	12,3

Примечание – толщина ванадий-титановых слоев $h_{V,Ti} = 0,5 \pm 0,2$ мкм

Note – Thickness of individual titanium layers: $h_{Ti} = 0.5 \pm 0.2$ μm

3. Результаты и их обсуждение

На основе анализа полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости микротвердости (HV) и максимального контактного давления (p_{max}) от толщины исследуемых многослойных покрытий. Установлено, что изменение величины HV от толщины (h) носит нелинейный характер (рис. 4), что можно объяснить уменьшением влияния материала подложки при увеличении толщины покрытий.

Известно [22, 23], что ванадий является одним из легирующих элементов титана, который за счет стабилизации его в β -области повышает не только пластичность, но и прочность. Это свойство титан-ванадиевых сплавов объясняет увеличение прочности (V, Ti) + (V, Ti)N покрытий, которое проявляется в увеличении максимального контактного давления при их разрушении (рис. 5). На графике видно, что покрытия (V, Ti) + (V, Ti)N являются в 1,3–1,5 раза более прочными по сравнению с аналогичными покрытиями Ti + TiN во всем исследованном диапазоне толщин. Кроме этого, анализируя динамику разрушения многослойных покрытий, было установлено, что титан-ванадиевые покрытия начинают разрушаться при большей нагрузке L_{CI} , по сравнению с покрытиями Ti + TiN (рис. 6), что также подтверждает их более высокую прочность.

Установлено, что величина критической нагрузки (L_{CI}), характеризующая появление первых хрупких сколов (например, рис. 1, z), нелинейно зависит от толщины нитридных слоев (h_N). Для обоих типов покрытий наблюдается перегиб кривой в диапазоне h_N от 2 до 3 мкм (рис. 6), что может свидетельствовать о существовании в этом диапазоне некоторой критической толщины нитридных слоев. При превышении этой величины $h_N > 2,5$ мкм наблюдается резкое в 2,0–2,5 раза увеличение L_{CI} , что свидетельствует о повышении стойкости покрытия к образованию сколов и разрушению.

Основой для повышения износостойкости исследуемых покрытий являются нитридные слои, обеспечивающие сопротивление внешнему механическому воздействию. В этой связи критическая нагрузка разрушения (L_{CI}), характеризующая в настоящем исследовании стойкость нитридных слоев к разрушению, напрямую связана с величиной относительной износостойкости покрытий при их газоабразивном изнашивании (рис. 7). Установленная зависимость справедлива как для титан-ванадиевых покрытий (V, Ti) + (V, Ti)N, так и для покрытий Ti + TiN. Это делает возможным проводить предварительную оценку износостойкости многослойных покрытий по величине (L_{CI}) при прочих равных условиях и, таким об-

разом, выбирать наиболее перспективные варианты для испытаний на газообразное изнашивание.

При анализе разрушения материала покрытий кроме нагрузки (L_{C1}) определяли нагрузку полного разрушения покрытия (L_{C2}) и удаления его с материала подложки (рис. 1, д). Отношение величин (L_{C2}/L_{C1}) характеризует насколько полно многослойное покрытие способно сопротивляется развитию поверхностных дефектов, начиная с первого видимого скола до полного разрушения покрытия. Установлено, что это отношение имеет прямую зависимость от

количества слоев многослойных покрытий (рис. 8). Это может свидетельствовать о роли границ металлических и нитридных слоев покрытий в качестве барьеров, сдерживающих развитие хрупких трещин, например, вследствие некогерентности решеток, а также различий физико-механических свойств и величин внутренних остаточных напряжений. Очевидно, что при выборе конструкции многослойного покрытия с целью обеспечения его износостойкости количество слоев при прочих равных условиях должно выбираться максимально возможным.

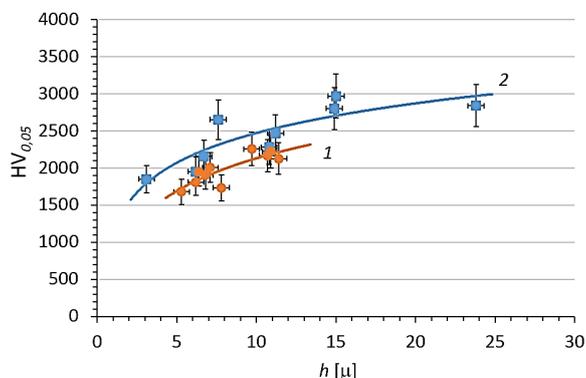


Рис. 4. Зависимость величины микротвердости (HV) от толщины покрытия (h):
 1 – (V, Ti) + (V, Ti)N; 2 – Ti + TiN

Fig. 4. Dependence of microhardness (HV) on coating thickness (h):
 1 – (V, Ti) + (V, Ti)N; 2 – Ti + TiN

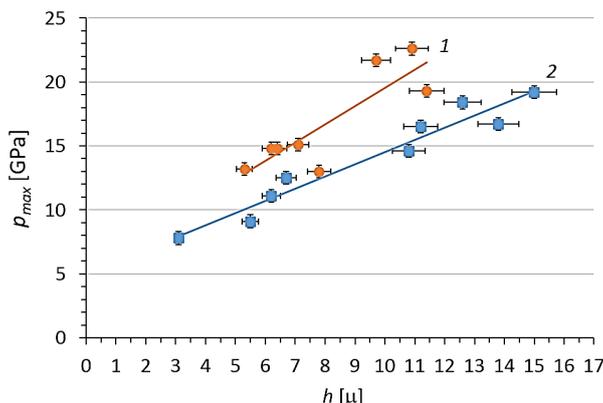


Рис. 5. Зависимость максимального контактного давления (p_{max}) от толщины покрытия (h):
 1 – (V, Ti) + (V, Ti)N; 2 – Ti + TiN

Fig. 5. Dependence of maximum contact pressure (p_{max}) on coating thickness (h):
 1 – (V, Ti) + (V, Ti)N; 2 – Ti + TiN

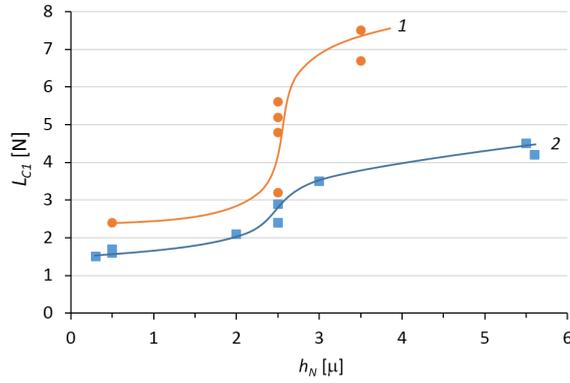


Рис. 6. Зависимость критической нагрузки образования первого скола (L_{C1}) от толщины нитридных слоев покрытий (h_N):
 1 – (V, Ti) + (V, Ti)N; 2 – Ti + TiN

Fig. 6. Dependence of the critical load for first spallation (L_{C1}) on the nitride layers thickness (h_N):
 1 – (V, Ti) + (V, Ti)N; 2 – Ti + TiN

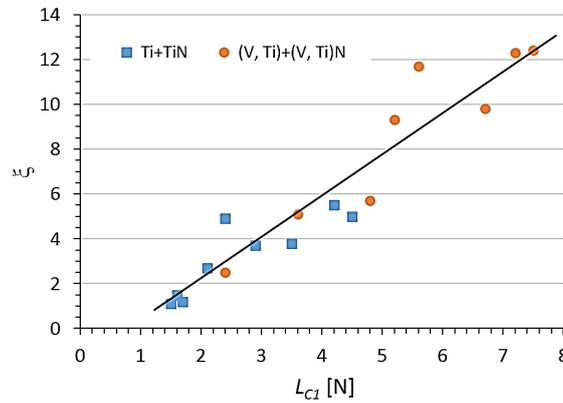


Рис. 7. Зависимость относительной износостойкости (ξ) от критической нагрузки появления первого скола покрытия (L_{C1})

Fig. 7. Dependence of relative wear resistance (ξ) on the critical load for first spallation (L_{C1})

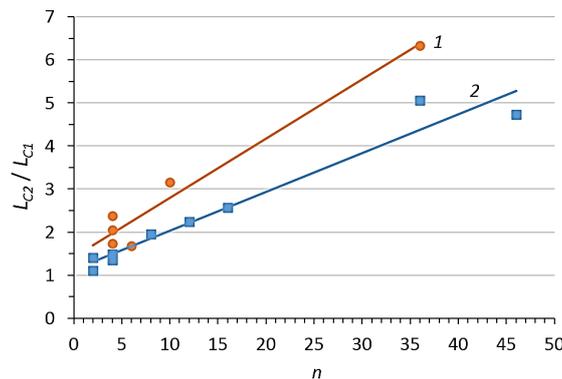


Рис. 8. Зависимость отношения критических нагрузок разрушения многослойных покрытий (L_{C2}/L_{C1}) от количества их слоев (n):
 1 – (V, Ti) + (V, Ti)N; 2 – Ti + TiN

Fig. 8. Dependence of the ratio of critical loads for multilayer coating failure (L_{C2}/L_{C1}) on the number of layers (n):
 1 – (V, Ti) + (V, Ti)N; 2 – Ti + TiN

Выводы

Описана методика механических испытаний износостойких покрытий и построение зависимостей контактного давления от прилагаемой нагрузки на полусферический алмазный индентор. Получаемые зависимости позволяют определять максимальное контактное давление, являющееся критерием разрушения материала покрытия, сопровождаемое образованием трещин и сколов.

Проведенные испытания многослойных ионно-плазменных покрытий на основе титана, ванадия и их нитридов позволили установить, что наиболее прочным по критерию максимального контактного давления ($p_{\max} = 24,6$ ГПа) является десятислойное титан-ванадиевое покрытие общей толщиной $h = 10,9$ мкм и толщиной нитридных слоев $h_N = 2,5$ мкм. Сделано предположение, что одновременное нанесение ванадия с титаном обеспечивает повышение прочности многослойных покрытий типа (V, Ti) + (V, Ti)N в следствие твердорастворного упрочнения α -титана и стабилизации его в β -области. Наблюдаемое упрочнение сопровождается повышением пластичности β -Ti и сравнительным уменьшением микротвердости.

Установлена линейная зависимость относительной износостойкости при газобразивном изнашивании от критической нагрузки разрушения (L_{CI}), характеризующей прочность нитридных слоев исследуемы покрытий. Это позволяет проводить предварительную оценку износостойкости покрытий и, таким образом, выбирать наиболее перспективные варианты для дальнейших исследований.

Для повышения механических свойств и износостойкости многослойных ионно-плазменных покрытий на основе титана, ванадия и их нитридов необходимо стремиться к увеличению общей толщины покрытия (h) за счет количества слоев (n), границы которых являются барьерами, сдерживающие развития хрупких трещин. Минимальная толщина нитридных слоев (h_N) должна превышать

2,5 мкм, что более чем в два раза повышает стойкость к образованию сколов. Таким образом, нанесением многослойных ионно-плазменных покрытий одновременно может быть реализовано два механизма повышения износостойкости: сопротивление к появлению первичных (зародышевых) микротрещин и сдерживание их развития на границах металлических и нитридных слоев.

Полученные результаты рекомендуется учитывать при выборе конструкций многослойных покрытий на основе титана, ванадия и их нитридов для упрочнения деталей из титановых сплавов, в частности рабочих лопаток компрессора стационарных газотурбинных установок и паровых турбин. Продолжение работ будет направлено на исследование микро- и субструктуры материала многослойных ионно-плазменных покрытий с целью подробного исследования механизмов их упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The strategy of Russia's energy policy until 2035. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated June 9, 2020, No. 1523-r [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565068231> (access date: 03/21/2025). (In Russian) [Стратегия энергетической политики России до 2035. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г., № 1523-р [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565068231> (дата обращения: 21.03.2025)].
2. The forecast of scientific and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030 (approved by the Government of the Russian Federation on January 3, 2014) [Electronic resource]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380/#ixzz5gFsj5Bv4> (access date: 04/02/2025). (In Russian) [Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Правительством РФ 3 января 2014 г.) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380/#ixzz5gFsj5Bv4> (дата обращения: 02.04.2025)].
3. Vereshaka A. S., Grigoriev S. N., Tabakov V. P. Methodological principles of creation the functional coatings of new generation for cutting tools manufacture // Hardening Technologies and Coatings. 2, 18–39 (2013). (In Russian) [Верещака А. С., Григорьев

С. Н., Табаков В. П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2, 18–39 (2013)].

4. Vereschaka A. S., Dacheva A.V., Anikeev A. I. Working capacity enhancement of cutting tools in terms of machining of difficult-to-cut Materials by complex application of wear-resistant coating and hard alloy // Izvestiya MGTU “MAMI”. 1(9), 112–127 (2010). (In Russian) [Верещака, А. С., Дачева А. В., Аникеев А. И. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава // Известия МГТУ «МАМИ». 1(9), 112–127 (2010)].

5. Shekhtman S. R., Budilov V. V., Mukhin V. S. Nanotechnologies of surface treatment of parts based on vacuum ion plasma methods. Physical foundations and technical solutions. Moscow: Nauka, 2008. 194 p. (In Russian) [Шехтман С. Р., Будилов В. В., Мухин В. С. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов. Физические основы и технические решения. М.: Наука, 2008. 194 с].

6. Alexandrov D. A., Gorlov D. S., Muboyadjyan S. A. Nanolayer strengthening coatings for the protection of steel and titanium GTE compressor blades // Aviation Materials and Technologies. 3 (2011). (In Russian) [Александров Д. А., Горлов Д. С., Мубояджян С. А. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 3 (2011)].

7. Muboyadjyan S. A., Azarovsky E. N. Investigation of a new process of ion modification of the surface of compressor steels in vacuum-arc plasma of titanium // Metally. 6 (2013). (In Russian) [Мубояджян С. А., Азаровский Е. Н. Исследование нового процесса ионного модифицирования поверхности компрессорных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана // Металлы. 6 (2013)].

8. Muboyadzhyan S. A., Gorlov D. S., Shchepilov A. A., Konnova V. I. Studying of damping capacity of ion-plasma coatings // Aviation Materials and Technologies. 5, 67–72 (2014). (In Russian) [Мубояджян С. А. Исследование демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий / Мубояджян С. А., Горлов Д. С., Щепилов А. А., Коннова В. И. // Авиационные материалы и технологии. 5, 67–72 (2014)].

9. Alexandrov, D. A., Gorlov, S. A. Budinovskiy, D. A. Application of a complex of ion-plasma technologies to protect thr compressor blades of a helicopter gas turbine engine from erosive wear and fretting // Proceedings of VIAM. 2(96), 71–81 (2021). (In Russian) [Александров

Д. А., Горлов Д. С., Будиновский С. А. Применение комплекса ионно-плазменных технологий для защиты лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя от эрозионного износа и фреттинга // Труды ВИАМ. 2(96), 71–81 (2021)].

10. Smyslov A. M., Dyblenko Yu. M., Smyslova M.K., Selivanov K. S., Mingazhev S.D., Mingazheva A.A. New vacuum unit and technology of combined hardening treatment, application of coatings on parts of gas turbine engines and power plants // Vestnik UGATU. 17, 1(54), 108–113 (2013). (In Russian) [Смыслов А. М., Дыбленко Ю. М., Смыслова М.К., Селиванов К. С., Мингажев А. Д., Мингажева А. А. Новая вакуумная установка и технология комбинированной упрочняющей обработки, нанесения покрытий на детали ГТД и энергетических установок // Вестник УГАТУ. 17(54), 108–113 (2013)].

11. Patent RF No. 2009100667/02; 11.01.2009. (In Russian) [Патент РФ № 2009100667/02; 11.01.2009].

12. Patent RF No. 2019124707; 05.08.2019. (In Russian) [Патент РФ № 2019124707; 05.08.2019].

13. Patent RF No. 2007145766/02; 10.12.2007. (In Russian) [Патент РФ № 2007145766/02; 10.12.2007].

14. Patent RF No. 2008137326/02; 15.01.2008. (In Russian) [Патент РФ № 2008137326/02; 15.01.2008].

15. Patent RF No. 2009141158/02; 09.11.2009. (In Russian) [Патент РФ № 2009141158/02; 09.11.2009].

16. Dyblenko Yu. M., Prokopchuk K. A., Selivanov K. S., Smyslov A. M. Increasing the erosion resistance of compressor blades of gas turbine engine and gas pumping unit by applying vacuum-plasma coatings // Hardening Technologies and Coatings. 19, 9(225), 410–415. (In Russian) [Дыбленко Ю. М., Прокопчук К. А., Селиванов К. С., Смыслов А. М. Обеспечение сопротивления эрозии материалов лопаток компрессора газотурбинного двигателя и газоперекачивающего аппарата путем нанесения вакуумно-плазменных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 19, 9(225), 410–415 (2023)].

17. ASTM C1624-22 (2022) Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Scratch Testing. DOI: 10.1520/C1624-22.

18. Selivanov K. S. Evaluation of the surface material strength using the “scratch-test” method // Vestnik UGATU. 19, 1(67), 100–106 (2015). (In Russian) [Селиванов, К. С. Оценка прочности материала поверхности при его испытании методом «Скретч-тест» // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 19, 1(67), 100–106 (2015)].

19. Barvinok V. A. Control of stress state and properties of plasma coatings. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 384 p. (In Russian) [Барвинок В. А. Управление

напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384 с].

20. Budilov V. V. Ensuring operational properties of gas turbine engine parts using vacuum ion-plasma processing methods taking into account technological heredity: abstract of a dissertation... Doctor of Technical Sciences: 05.07.05. Moscow: Moscow Aviation Institute, 1995. 41 p. (In Russian) [Будилов В. В. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД вакуумными ионно-плазменными методами обработки с учетом технологической наследственности: автореферат диссертации... доктора технических наук: 05.07.05. М.: Московский авиационный институт, 1995. 41 с].

21. Johnson K. L. Contact Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 452 p. DOI: 10.1017/CBO9781139171731

22. Akhonin S. V., Selin R. V., Berezos V. A., Pikulin A. N., Severin A. Yu., Erokhin A. G. Development of a new high-strength titanium alloy // Modern Electrometallurgy. 4(125), 22–26 (2016). (In Russian) [Ахонин С. В., Селин Р. В., Березос В. А., Пикулин А. Н., Северин А. Ю., Ерохин А. Г. Разработка нового высокопрочного титанового сплава // Современная электрометаллургия. 4(125), 22–26 (2016)].

23. Polkin I. S., Egorova Yu. B., Davydenko L. V. Alloying, phase composition and mechanical properties of titanium alloys // Light Alloy Technology. 2, 4–13 (2022). (In Russian) [Полькин И. С., Егорова Ю. Б., Давыденко Л. В. Легирование, фазовый состав и механические свойства титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2, 4–13 (2022)].