

18. Miroshnychenko, Yu. Quantum-chemical modeling of functionalized silica surface [Text] / Yu. Miroshnychenko, Yu. Beznosyk, O. Smirnova, Yu. Zub // Research bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". – 2011. – Vol. 3. – P. 141–145.
19. Miroshnychenko Yu. Quantum-chemical modeling of silica surface functionalized with nitrogen, phosphorus, and sulfur-containing groups [Text] / Yu. Miroshnychenko, Yu. Beznosyk, O. Smirnova, Yu. Zub // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2012. – Vol. 2, Issue 14 (56). – P. 49–51. – Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3958/3626>

*Проведено системний аналіз переваг використання вакуумно-плазмових покриттів для підвищення зносостійкості деталей парових турбін. Показані можливості використання структурного підходу до інженерії поверхні для контролю ефективності фізико-технологічних параметрів, які використовували при отриманні покриттів. В якості структурних параметрів експрес контролю функціональних властивостей нітридних покриттів з ГЦК кристалічною решіткою запропоновано використовувати ступінь текстурування і середній розмір кристалітів*

*Ключові слова: лопатка турбіни, вузол тертя-ковзання, покриття, текстура, розмір кристалітів, твердість, зносостійкість*

*Проведен системный анализ преимуществ использования вакуумно-плазменных покрытий для повышения износостойкости деталей паровых турбин. Показаны возможности использования структурного подхода к инженерии поверхности для контроля эффективности, применяемых при получении покрытий, физико-технологических параметров. В качестве структурных параметров экспрес контроля функциональных свойств нитридных покрытий с ГЦК кристаллической решеткой предложено использовать степень текстурированности и средний размер кристаллитов*

*Ключевые слова: лопатка турбины, узел трения-скольжения, покрытие, текстура, размер кристаллитов, твердость, износостойкость*

УДК 621.793.1: 543.442.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39456

# АПРОБАЦІЯ СТРУКТУРНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІИ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕННЯ ПОКРЫТИЙ, ПОВЫШАЮЩИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЛОПАТОК ТУРБИН

**О. В. Соболев**Доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой\*

E-mail: sool@kpi.kharkov.ua

**В. В. Дмитрик**Доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой\*\*

E-mail: svarka126@ukr.net

**Н. А. Погребной**Кандидат технических наук, профессор,  
декан механико-технологического факультета\*

E-mail: pogrebnoy.n@yandex.ua

**Н. В. Пинчук**

Аспирант\*

E-mail: spiritnata@ya.ru

**А. А. Мейлехов**

Аспирант\*

E-mail: meilekhov@mail.ru

\*Кафедра материаловедения\*\*\*

\*\*Кафедра сварки\*\*\*

\*\*\*Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

## 1. Введение

Лопатки роторов паровых турбин являются наиболее сложной и высоконагруженной частью турбины и в значительной мере определяют надежность работы всего агрегата. При этом, лопатки последней

ступени цилиндра низкого давления (ЦНД) определяют порог предельной мощности турбины и поэтому надежность их работы уделяется наибольшее внимание [1]. При эксплуатации паровых турбин энергетических станций разрушение лопаток происходит в результате воздействия ряда факторов, в

том числе, вызывающих капельно-ударную эрозию. Наибольшему эрозионному износу подвергаются рабочие лопатки последних ступеней ЦНД, длина пера которых составляет 940–1050 мм (при окружной скорости, достигающей 700 м/с). Так как стоимость изготовления лопатки может превышать 100 тыс. гривен, то продление ресурса новых или восстановленных после износа лопаток является актуальной задачей, которая решается за счет применения износостойких покрытий.

В последние годы разработки в области инженерии поверхности показали высокую эффективность при их включении в техпроцесс (как на стадии изготовления лопаток, так и при их восстановлении) операции нанесения износостойких вакуумно-дуговых покрытий.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Разработки в области повышения надежности и длительности эксплуатации рабочих и направляющих лопаток паровых турбин, а также некоторых элементов газотурбинных двигателей путем нанесения на их рабочие поверхности защитно-упрочняющих покрытий ведутся достаточно давно [2–8]. На лопатки турбин из жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта, используемых для работы в условиях высоких температур 1400–1500 °С, с целью снижения интенсивности их износа осаждают, как правило, жаростойкие диффузионные и конденсированные алюминидные покрытия [9].

Для газотурбинных двигателей (ГТД), лопатки которых работают при критической температуре, близкой к температуре плавления основы, используют электронно-лучевой метод нанесения многоэлементных сплавов MeCrAlY (где Me-NiCoFe), MeCrAlYHfSiZr и керамики на основе ZrO<sub>2</sub>, стабилизированного Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [9]. Основные получаемые в защитном слое системы:

- однослойные, металлические, типа MeCrAlY, MeCrAlYHfSiZr;

- однослойные, композиционные, микрослойного типа с чередованием слоев MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr)/MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr)+MeO, где MeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или ZrO<sub>2</sub> +6...8 мас % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

- двухслойные покрытия с внутренним металлическим MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr) и внешним керамическим слоями;

- двухслойные покрытия с внутренним композиционным MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr)+MeO дисперсноупрочненного или микрослойного типов и внешним керамическим (ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) слоями;

- трехслойные покрытия с внутренним и промежуточным металлическими слоями на основе сплавов MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr) и внешним слоем на основе керамики (ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);

- трехслойные покрытия с внутренним металлическим MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr), промежуточным композиционным MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr)+MeO дисперсноупрочненного или микрослойного типов и внешним керамическим (ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) слоями;

- трехслойные покрытия с внутренним металлическим MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr), промежуточным композиционным MeCrAlY (MeCrAlYHfSiZr)+MeO дисперсноупрочненного или микрослойного типов и внешним

керамическим (ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с элементами – дисперсными частицами боридов, которые окисляясь, залечивают микротрещины во внешнем керамическом слое, возникающие при термоциклах нагрев-охлаждение.

Общая толщина однослойных жаростойких покрытий не превышает, как правило, 150 мкм, двухслойных теплозащитных 200 мкм, трехслойных теплозащитных – 300 мкм.

Для защиты рабочих лопаток влажно-паровых ступеней от эрозионного износа преимущественно используется технология атомно-ионного распыления материалов в вакууме (АИР), которая базируется на использовании высокоэнергетического острофокусного электронного луча для нагрева и высокоскоростного испарения в вакууме металлов IV–VI групп [2–6].

Проведенный сравнительный анализ различных технологических процессов упрочнения лопаток показал (табл. 1), что использование в качестве внешнего износостойкого слоя вакуумно-плазменных покрытий имеют преимущества, как с точки зрения минимального изменения размеров изделия, так и времени осаждения элементов покрытия [2–7].

Таблица 1

Характеристика технологических процессов

Методы инженерии поверхности	Характеристика технологических процессов и покрытий		
	Технологическая толщина упрочненного слоя, мкм	Температура формирования, °С	Длительность процесса
Наплавка	До 5000	1120...1200	0,2...10 см <sup>2</sup> /мин
Закалка ТВЧ	До 3000	1050...1150	10...20 мм/с
Химико-термическая обработка	5...80	700...1450	1,5...100 ч
Гальванический	5...70	50...80	0,4...2 ч
Лазерный	1...50	До 1500	10...100 мм/с
Газотермическое напыление	30...150	200...300	2,5...3,5 ч
Вакуумно-плазменный метод	До 25	200...500	0,2...1,5 ч

Перспектива применения защитных эрозионно-стойких вакуумно-плазменных покрытий на рабочих и направляющих лопатках и элементах трения паровых турбин обусловлена также тем, что данные изделия в процессе эксплуатации имеют относительно невысокую рабочую температуру (до 500 °С) и достаточно низкую эрозионную стойкость в исходном, неупрочненном состоянии [8].

Так, использование вакуумно-плазменных покрытий стало необходимостью в связи с тем, что традиционное упрочнение для лопаток паровых турбин из сталей 15X11МФ и 20X13 припайкой пластин из стеллита (кобальто-хромо-вольфрамовые сплавы) на входную кромку оказалось не эффективным, что подтверждается в ряде работ, например [2]. Припайка пластин не решает в полном объеме проблемы эрозионного износа и при этом значительно ухудшает аэродинамические свойства лопаточного аппарата и КПД турбины.

Ключевым вопросом эффективного практического применения антиэрозионных и других типов покры-

тий является обоснованный выбор материала покрытия и технологии его получения. На сегодняшнее время в случае нанесения на перо лопаток из высокохромистых сталей, а также на детали клапанов высокого давления, рассматриваются в основном износостойкие и коррозионностойкие покрытия из нитридов, карбидов, карбонитридов титана, хрома, циркония, молибдена и др. Для наиболее часто используемых защитных покрытий механические характеристики (твердость, коэффициент трения) и данные по температурной стойкости к окислению приведены в табл. 2 [9–12].

Из табл. 2 видно, что в нитридных покрытиях на основе Ti изменение в элементе внедрения (замена части атомов N на C) приводит к небольшому увеличению твердости без заметного изменения стойкости к окислению и коэффициента трения. Более эффективным, с точки зрения повышения функциональных свойств, является использование многоэлементной металлической составляющей. Так, введение Al атомов приводит к повышению стойкости к окислению нитридных покрытий на основе Ti от 400 до 540 °C (табл. 2), а создание 3-х элементного твердого раствора Ti-Al-Cr – к стойкости при температурах выше 900 °C практически без уменьшения твердости.

Таблица 2

Физико-механические свойства используемых, защитных износостойких покрытий

Покрытие	Микротвердость, ГПа	Стойкость к окислению, (T <sub>max</sub> ), °C	Коэффициент трения
TiN	19,30–22,00	600	0,5
TiC	28,00–30,00	400	0,4
TiCN	30,00–32,00	400	0,4
TiAlN	30,00–35,00	540	0,4
TiAlCrN	30,00–35,00	920	0,4
CrN	16,50–21,50	700	0,5
ZrN	28,00	600	0,6
WC/C	15,00	300	0,2

Использование нитридов на основе хрома обусловлено спецификой матричного материала – обычно CrN используется для защиты высокохромистых сталей. Применение ZrN обусловлено его высокой стойкостью к радиационному воздействию, а WC/C – необходимостью получить минимальный коэффициент поверхностного трения [17].

Значительному повышению эксплуатационных характеристик способствовало внедрение выполненных в последние годы разработок и исследований по использованию многоэлементных нитридных покрытий. Так, установлено, что использование комплексного покрытия (Ti-Zr)N позволяет достичь предела разрушения при склерометрических испытаниях при нагрузке на индентор 12...14 Н, что соответствует значению прочности 6,4 ГПа [3].

В дальнейшем для повышения эксплуатационных свойств было предложено использовать тройные системы (по металлической составляющей), например (Ti-Zr-Al)N или (Ti-Zr-Si)N, и четверные, например (Ti-Zr-Mo-Cr)N или (Ti-Zr-Nb-Si)N [17]. Использование таких покрытий привело к повышению эксплуатационных характеристик. Однако разработки, сделанные в последние несколько лет, показали, что значительного изменения свойств можно добиться

только путем перехода к многоэлементным системам с числом составляющих металлических атомов, превышающим 5, когда создаются условия для высокотемпературного упорядочения из-за высокого значения энтропии для таких материалов (нитридов высокоэнтропийных сплавов) [18]. Кроме того, значительного повышения свойств можно достигнуть, применяя новые технологии осаждения, среди которых наиболее высокие свойства были получены путем высоковольтной импульсной стимуляции атомного упорядочения при осаждении вакуумно-дуговых нитридных покрытий [19]. Востребованность использования приведенного метода связана с необходимостью решения задачи, создания эффективного противэрозионного защитного покрытия для рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин, за счет значительно снижения структурных напряжений в покрытии при его осаждении. Разработка покрытия учитывает решение задачи уменьшения до приемлемого уровня значений структурных макронапряжений, возникающих в защитном покрытии на поверхности раздела «подложка-покрытие», в результате их суперпозиции с макронапряжениями, образующимися в слое покрытия при эксплуатации рабочей лопатки.

Созданный в настоящее время экспериментальный задел для достижения высокой эффективности процесса поверхностного модифицирования делает необходимым отнести к основным этапам технологического процесса получения эрозионно-стойких покрытий:

- предварительную очистку и разогрев поверхности основного металла;
- создание азотированного подслоя;
- нанесение покрытия из переходного металла в азотосодержащей атмосфере для формирования поверхностного нитрида.

В ряде случаев после нанесения в качестве окончательной операции используется стабилизирующий отжиг в вакуумной камере в течение 30 минут при температуре 450–500 °C.

Схема типичной структуры поверхностных слоев после описанных выше процессов приведена на рис. 1.

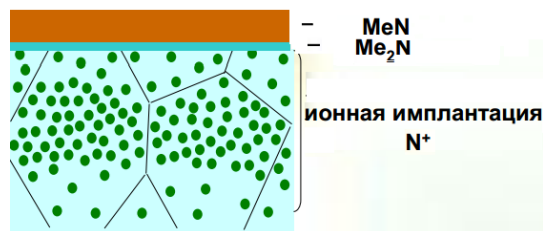


Рис. 1. Схема поверхности с осадненным однослойным покрытием после предварительного ионного азотирования базового материала

Образование переходного слоя Me<sub>2</sub>N обусловлено высокой подвижностью атомов азота и их частичным диффузионным перемещением в процессе осаждения из формируемых слоев покрытия в основной металл. Отметим, что обычно фаза Me<sub>2</sub>N в сравнении с фазой MeN имеет более сложную кристаллическую решетку и потому является более хрупкой. Известно, что чем выше теплота образова-

ния нитрида для используемого переходного металла, тем уже слой  $Me_2N$ . В этой связи, использование металлов с относительно невысокой теплотой образования нитридов, таких как Mo или Cr, приводят к образованию практически только слоя нестехиометрического состава.

Путем создания в матричном материале азотированного слоя (толщиной 40–80 мкм) и нанесения вакуумно-плазменного покрытия из нитрида переходного металла (толщиной 5–10 мкм) увеличивается износостойкость деталей, снижается коэффициент трения в узлах механизмов и износ пар трения в целом.

Используемая технология нанесения нитридного покрытия на азотированную поверхность обеспечивает повышение: пределов выносливости на 15–33 %; стойкости против капельной эрозии и абразивного износа в 1,5–3,0 раза, а также фреттинг-стойкости в 2–3 раза [9].

В настоящее время в связи с необходимостью освоения в Украине (прежде всего на ОАО «Турбоатом») производства рабочих лопаток из титановых сплавов, высокую актуальность приобретает поверхностная инженерия материалов для этого типа изделий.

С целью повышения эксплуатационных характеристик титановых лопаток находят применение различные способы инженерии поверхности. Например, для повышения усталостной прочности используется поверхностное пластическое деформирование титана [13]. Однако твердость, достигаемая при этом методе упрочнения, не обеспечивает достаточной стойкости к влажно-паровой эрозии, а повышение степени наклепа приводит к снижению коррозионной стойкости [14].

Как известно, износ (эрозия) – это изменение размеров, формы и массы поверхности вследствие разрушения. В случае лопаток паровых турбин основное разрушающее действие оказывает эрозионный износ, который определяется механическим действием мелких капель влаги, а также твердых частиц, и для установления качественных характеристик при проектировании защитных слоев может быть оценен путем проведения сравнительных испытаний по стандартизированным методикам абразивного износа [20].

Традиционные способы повышения стойкости к влажно-паровой эрозии лопаток из хромистых сталей – припайка и приварка стеллитовых пластин, электроискровое и кластерное упрочнение, плазменное, детонационное напыление [15] и др. неприемлемы для титановых сплавов из-за большой их склонности к окислению при нагреве и последующему растрескиванию, что вызывает появление недопустимых дефектов покрытия и поверхности [16].

Поэтому, наиболее удачным решением задачи повышения эксплуатационных характеристик может быть совмещение в одном технологическом цикле процесса азотирования (до глубины 50–80 мкм) с последующим нанесением защитного вакуумно-плазменного покрытия на основе нитрида титана (толщиной 7–10 мкм) [12, 13]. При этом формируется структура, плавно переходящая по своему структурно-фазовому состоянию и физико-химическим свойствам от покрытия на основе нитрида титана до основного материала.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является изучение влияния физико-технологических параметров при осаждении на текстурное состояние, размер кристаллитов и величину микродеформации вакуумно-плазменных нитридных покрытий (структурный подход) и установление критериев оптимизации режимов осаждения на основе структурного подхода для повышения стойкости покрытий к износу, в первую очередь абразивному.

В этой связи в качестве первой задачи данного исследования было установление закономерностей влияния новой технологии (импульсная стимуляция) и материалов (многоэлементные нитриды) на характер формирования текстуры, величину среднего размера кристаллитов и микродеформацию. В качестве основных технологических параметров осаждения были выбраны давление рабочей атмосферы и величина отрицательного потенциала смещения, подаваемого на подложку, что определяет структурный подход к оптимизации режимов осаждения. Установление структурных критериев, определяющих получение покрытий с наибольшей износостойкостью, являлось второй задачей данного исследования.

### 4. Методика получения и исследования вакуумно-дуговых нитридных покрытий

Покрытия получали при использовании модернизированной вакуумно-дуговой установки типа «Булат-6» [19]. После откачивания вакуумной камеры до давления  $1 \cdot 10^{-3}$  Па на подложки подавали отрицательный потенциал  $-1000$  В и при токе дуги 100 А производили очистку и активацию их поверхности бомбардировкой ионами титана в течение 3...4 мин. Затем в камеру напускали азот и получали покрытия при давлениях азотной рабочей атмосферы от  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $7 \cdot 10^{-1}$  Па.

В качестве материалов катода использовались: титан и высокоэнтропийный сплав на основе титана (Ti-Nb-V-Zr-Hf). Покрытия, толщиной 7–8 мкм получали при подаче потенциала смещения  $U_{см} = -50, -70, -100$  и  $-230$  В. При осаждении нитрида титана часть покрытий получали при подаче на подложку кроме постоянного отрицательного потенциала дополнительно импульсный высоковольтный потенциал величиной  $-800$  В с длительностью импульса 10 мкс и частотой 7 кГц.

Фазовый состав и структурное состояние исследовалось методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-3М в излучении  $CuK\alpha$  (длина волны  $\lambda = 0,154178$  нм) с использованием во вторичном пучке графитового монохроматора. Съёмка дифракционного спектра для фазового анализа проводилась в схеме  $\theta-2\theta$  сканирования с фокусировкой по Брегу-Брентано в интервале углов 25...90 град. Съёмка осуществлялась в поточечном режиме с шагом сканирования  $\Delta(2\theta) = 0,02...0,2$  град и длительностью накопления импульсов в каждой точке 10...40 с (в зависимости от ширины и интенсивности дифракционных максимумов). Для расшифровки дифрактограмм использовалась база дифракционных данных JCPDS.

Проведение тестов на изнашивание при помощи метода сферической выемки осуществлялся на при-

боре “CSM Instrument Calowear”. Метод сферической выемки – процесс формирования выемки посредством истирания материала образца с использованием алмазного абразива при вращении шара определённого диаметра, покрытого абразивной средой. Вращаясь, шар выработывает сферическую выемку износа на поверхности образца. Размер получаемой выемки определялся при помощи оптического микроскопа, а величина износа рассчитывалась по модели абразивного износа [20].

### 5. Влияние режимов осаждения на структуру и механические свойства нитридных покрытий

Как следует из обобщенных в статье [21] результатов, увеличение отношения интенсивностей дифракционных пиков от плоскостей (111) и (200):  $I(111)/I(200)$  приводит к существенному повышению стойкости к эрозии покрытий нитрида титана. Таким образом, текстура покрытия является очень важным фактором, определяющим его функциональные характеристики. Это делает необходимым установления взаимосвязи между условиями осаждения → структурой (текстурой, субструктурными характеристиками) → функциональными (в данном случае – механическими) характеристиками, что можно отнести к основным данным в области вакуумно-плазменной инженерии поверхности.

Анализ результатов рентгеноструктурных исследований показал, что как для моонитрида титана, так и для нитридов высокоэнтропийных сплавов на его основе, при подаче постоянного отрицательного потенциала смещения  $U_{см} = (-50...-230)$  В формируется аксиальная текстура с преимущественной ориентацией кристаллитов с осью [111] перпендикулярной плоскости роста, что проявляется на спектрах в виде относительного усиления интенсивности дифракционных пиков {111} (рис. 2, а, б).

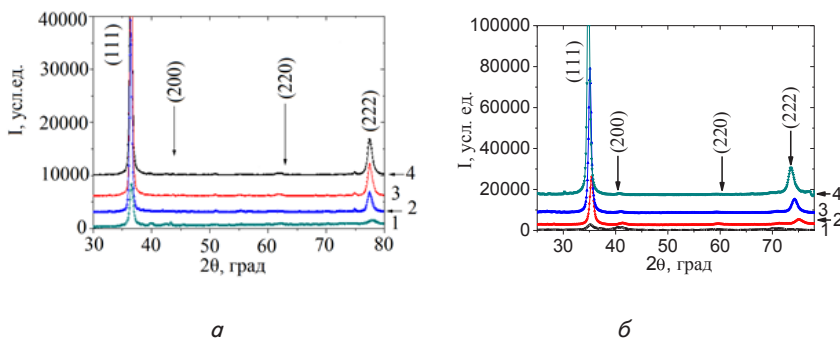


Рис. 2. Дифракционные спектры покрытий, полученные при разном давлении азотной атмосферы  $P_N$ : а – покрытия TiN, полученные при постоянном отрицательном потенциале -230 В; б – высокоэнтропийные нитридные покрытия (Ti-Nb-V-Zr-Hf)N, полученные при постоянном отрицательном потенциале – 100 В Па;  $P_N$ , Па: 1 –  $4 \cdot 10^{-2}$ ; 2 – 0,1; 3 – 0,3; 4 – 0,65

Давление рабочей (азотной) атмосферы являлось основным параметром влияния при осаждении, приводящим к изменению текстуры.

Видно (рис. 2, а), что для нитрида титана, эффективно используемого в настоящее время в технологическом процессе инженерии поверхности агрегатов турбин, повышение степени текстурированности с увеличением давления приводит к росту твердости (рис. 3, а), что особенно заметно при большой степени текстурированности с отношением  $I(111)/I(200) > 100$  (рис. 3, а, зависимость 1). При этом использование высоковольтной импульсной стимуляции (рис. 3, зависимость 2), сопровождающееся повышением средней энергии, а также подвижностью частиц при осаждении приводит к повышению твердости вследствие залечивания микродефектов и релаксации высоких конденсационных напряжений [19], что приводит к повышению твердости. Исследование на абразивный износ (рис. 3, б) показало, что повышение твердости коррелирует с увеличением стойкости покрытия к абразивному износу, уменьшая изношенный объем более чем в 1,7 раз (рис. 3, б, зависимости 1 и 2).

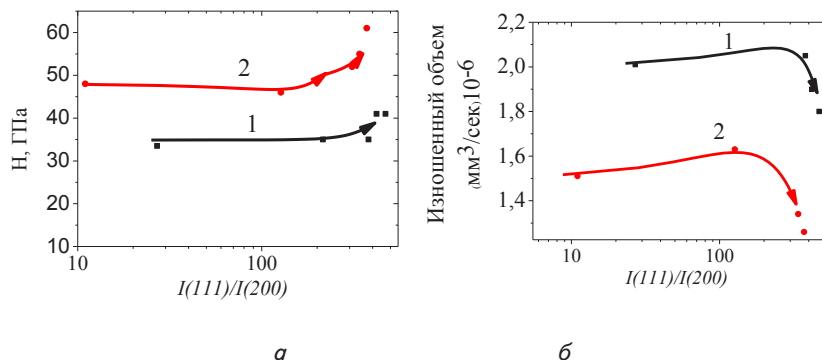


Рис. 3. Зависимости твердости и стойкости к абразивному износу покрытий нитрида титана с разной степенью текстурированности, осажденных при  $U_{см} = -230$  В без подачи и с подачей высоковольтных импульсов при осаждении: а – твердость; б – стойкость к абразивному износу: 1 – без подачи высоковольтных импульсов ( $U_{см} = -230$  В); 2 – с подачей высоковольтных импульсов

Для многоэлементных высокоэнтропийных сплавов (Ti-V-Zr-Nb-Hf-Ta)N тенденция повышения твердости с ростом отношения  $I(111)/I(200)$  прослеживается для всех используемых  $U_{см}$  (рис. 4, а, б) только до значения  $I(111)/I(200) \leq 20$ .

При  $I(111)/I(200) > 20$  твердость покрытий снижается, что может быть связано с формированием при этом второй радиационно-стимулированной текстуры с осью [110] перпендикулярной плоскости роста.

В соответствии с изменением твердости ведут себя и зависимости износоустойчивости (рис. 4, б). Видно, что понижение твердости приводит к уменьшению стойкости к абразивному износу при большом

отношении  $I(111)/I(200)$ , что в меньшей мере проявляется для низкого  $U_{cm} = -50$  В (рис. 4, зависимость 1). Причины понижения твердости многоэлементного сплава при большом отношении  $I(111)/I(200)$  находятся в области изменений на субструктурном уровне.

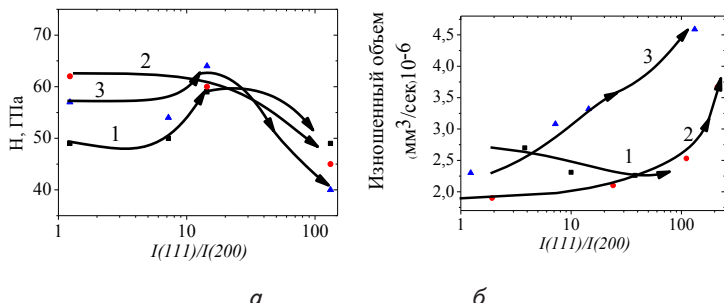


Рис. 4. Зависимости твердости и стойкости к абразивному износу для покрытий (Ti-V-Zr-Nb-Hf-Ta)N с разной степенью текстурированности: а – твердость; б – стойкость к абразивному износу;  $U_{cm}$ , В: 1 – -50; 2 – -100; 3 – -230

Действительно, в этой области отношений  $I(111)/I(200)$  наблюдается значительное увеличение размеров кристаллитов (рис. 5, а) при релаксации микродеформации (рис. 5, б). Высокое значение последней, достигающей 1,2%, определяется деформацией, связанной с расположением в узлах кристаллической решетки атомов с 5-ю разными атомными радиусами в случае высокоэнтропийного нитрида (Ti-V-Zr-Nb-Hf-Ta)N.

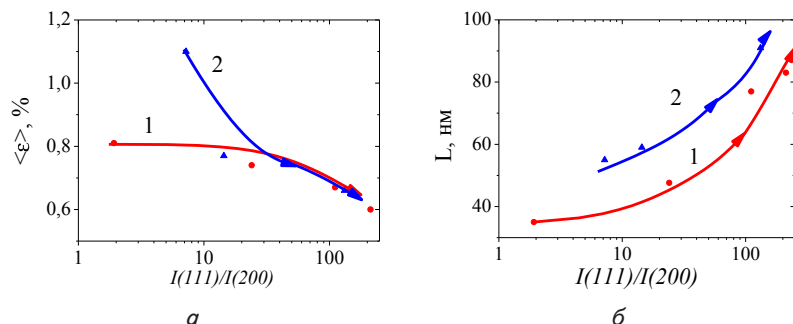


Рис. 5. Зависимости субструктурных характеристик покрытий нитридов высокоэнтропийного сплава (Ti-V-Zr-Nb-Hf-Ta) N с разной степенью текстурированности: а – размер кристаллитов; б – микродеформация;  $U_{cm}$ , В: 1 – -100; 2 – -230

Как было установлено в работе [18], в отличие от TiN, эффект упорядочения нитридов высокоэнтропийных сплавов (Ti-V-Zr-Nb-Hf-Ta)N обеспечивает сохранение их механических свойств при нагреве до высоких температур. Так, твердость при температуре отжига 1300 °С не только не падает, а вследствие упорядочения возрастает на несколько процентов.

Если сравнить результаты по стойкости к абразивному износу для моонитрида титана и высокоэнтропийного сплава, то видно, что наибольшую стойкость к износу при невысоких рабочих температурах показывают покрытия TiN, полученные в условиях импульсной стимуляции.

## 6. Выводы

1. Вакуумно-плазменные покрытия нитрида титана, полученные в условии высоковольтной импульсной стимуляции, имеют высокие характеристики стойкости к абразивному износу при сравнительно невысокой температуре (до 500 °С), что позволяет рекомендовать их для защиты лопаток паровых турбин ступени низкого давления, изготовленных как из сталей, так и из титановых сплавов.

2. Основным экспресс-критерием стойкости покрытий нитрида титана к абразивному износу может служить твердость поверхности, при повышении которой стойкость в условиях абразивного изнашивания увеличивается.

3. Использование покрытий из нитридов высокоэнтропийных сплавов дает наибольший эффект при их применении в виде защитных на лопатках газотурбинных двигателей, где важно сохранение высоких механических характеристик при больших температурах (превышающих 1300 °С).

## 7. Благодарности

Авторы выражают благодарность д. т. н. Андрееву А. А. за предоставленные образцы и д. т. н. Горбаню В. Ф. за проведение сравнительных испытаний покрытий на твердость.

## Литература

1. Пряхин, В. В. Проблемы эрозии турбинных рабочих лопаток [Текст] / В. В. Пряхин, О. А. Поваров, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. – 1984. – № 10. – С. 25–31.
2. Картмазов, Г. Н. Коррозионно-эрозионностойкие покрытия для рабочих лопаток паровых турбин [Текст] / Г. Н. Картмазов, Ю. В. Лукирский, Г. В. Кирик, В. Г. Маринин, Ю. И. Поляков, А. А. Дейнека // Наука та інновації. – 2012. – Т. 8, № 3. – С. 17–22.
3. Селиванов, К. С. Исследования свойств вакуумно-плазменных покрытий методом склерометрирования на установке CSM Scratch Test. Технология машиностроения [Текст] / К. С. Селиванов, А. М. Смыслов, А. Н. Петухов // Уфа: Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 230–236.
4. Мингажев, А. Д. Защитное покрытие для лопаток паровых турбин [Текст] / А. Д. Мингажев, А. В. Новиков, Н. К. Криони, Р. Р. Бекишев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2014. – № 4. – С. 257–278.
5. Мухин, В. С. Инженерия поверхности деталей машин [Текст] / В. С. Мухин, А. М. Смыслов // Вестник УГАТУ. Машиностроение. – 2009. – Т. 12, № 4 (33). – С. 106–112.

6. Новиков, И. И. Повышение эрозионной стойкости сталей, применяемых в энергомашиностроении [Текст] / И. И. Новиков, Г. А. Филиппов, А. М. Мордухович, О. А. Кривда, И. А. Шалобасов, Б. Я. Ивницкий // Энергомашиностроение. – 1989. – № 12. – С. 15–17.
7. Похмурський, В. І. Розробка та дослідження покриттів для захисту від фретинг-корозії [Текст] / В. І. Похмурський, В. М. Мацевітій, О. С. Калахан, І. Б. Казак, К. В. Вакуленко, С. В. Ляшок // Проблемы машиностроения. – 2010. – Т. 13, № 2. – С. 61–67.
8. Бушуев, М. Н. Технология производства турбин [Текст] / М. Н. Бушуев. – М.: Машиностроение, 1966. – 416 с.
9. Мубояджан, С. А. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГДТ [Текст] / С. А. Мубояджан, В. П. Лесников, В. П. Кузнецов // Екатеринбург: Изд-во «Квист», 2008. – 208 с.
10. Гецов, Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. В двух книгах. Кн. 1 [Текст] / Л. Б. Гецов. – Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010. – 612 с.
11. Материалы и прочность оборудования ТЭС: учеб. пособие [Текст] / под ред. В. М. Боровкова, Л. Б. Гецова. – СПб.: Изд-во Политехн. Университета, 2008. – 610 с.
12. Будилов, В. В. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов: Физические основы и технические решения [Текст] / В. В. Будилов, В. С. Мухин, С. Р. Шехман. – М.: Наука, 2008. – 194 с.
13. Кузнецов, Н. Д. Технологические методы повышения надежности деталей машин [Текст] / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин, В. И. Волков. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
14. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст] / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 239 с.
15. Гонсеровский, Ф. Г. Упрочнение и ремонт стальных паротурбинных рабочих лопаток после эрозионного износа [Текст] / Ф. Г. Гонсеровский // Электрические станции. – 1998. – № 8. – С. 37–41.
16. Солонина, О. П. Жаропрочные титановые сплавы [Текст] / О. П. Солонина, С. Г. Глазунов. – М.: Metallurgy, 1976. – 447 с.
17. Соболев, О. В. Инженерия вакуумно-плазменных покрытий [Текст] / О. В. Соболев, Н. А. Азаренков, А. Д. Погребняк, В. М. Береснев. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2011. – 344 с.
18. Sobol', O. V. Reproducibility of the single-phase structural state of the multielement high-entropy Ti–V–Zr–Nb–Hf system and related superhard nitrides formed by the vacuum-arc method [Text] / O. V. Sobol', A. A. Andreev, V. F. Gorban', N. A. Kravivka, V. A. Stolbovoi, I. V. Serdyuk, V. E. Fil'chikov // Technical Physics Letters. – 2012. – Vol. 38, Issue 7. – P. 616–619. doi: 10.1134/s1063785012070127
19. Sobol', O. V. Effect of high-voltage pulses on the structure and properties of titanium nitride vacuum-arc coatings [Text] / O. V. Sobol', A. A. Andreev, S. N. Grigoriev, V. F. Gorban', M. A. Volosova, S. V. Aleshin, V. A. Stolbovoi // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – Vol. 54, Issue 3-4. – P. 195–203. doi: 10.1007/s11041-012-9481-8
20. Rutherford, K. L. A Micro-Abrasive Wear Test, with Particular Application to Coated Systems [Text] / K. L. Rutherford, I. M. Hutchings // Surface & Coatings Technology. – 1996. – Vol. 79, Issue 1-3. – P. 231–239. doi: 10.1016/0257-8972(95)02461-1
21. Sue, J. A. Effect of Crystallographic Orientation on Erosion Characteristics of ARC Evaporation Titanium Nitride Coating [Text] / J. A. Sue, H. H. Troue // Surface and Coatings Technology. – 1987. – Vol. 33. – P. 169–181. doi: 10.1016/0257-8972(87)90186-1