

УДК 629.7.023

Д.А. Александров¹, С.А. Мубояджян¹, П.Л. Журавлева¹, Д.С. Горлов¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ И АССИСТИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭРОЗИОННОСТОЙКОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73

Исследовано влияние способов подготовки поверхности образца перед нанесением покрытия на стойкость к эрозионному износу ионно-плазменного покрытия из нитрида циркония. Показано влияние подготовки поверхности перед нанесением нитрида циркония и ассистированного осаждения на эрозионную стойкость композиций «сплав–покрытие», а также направления вращения катодных пятен вакуумной дуги по кольцевой траектории на поверхности цилиндрического катода по сравнению с направлением вращения обрабатываемых изделий на планетарном приводе установки МАП-3 для нанесения ионно-плазменных покрытий. Проведены исследования фазового состава покрытий, определены периоды решетки и размер областей когерентного рассеяния, величина остаточных напряжений, проведены испытания на стойкость к эрозионному износу композиций «сплав–покрытие». Установлено влияние исследуемых параметров технологического процесса на эрозионную стойкость ионно-плазменного покрытия нитрида циркония.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, эрозионностойкие покрытия, ассистированное осаждение, покрытия для лопаток компрессора.

D.A. Aleksandrov¹, S.A. Muboyadzhyan¹, P.L. Zhuravleva¹, D.S. Gorlov¹

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SURFACE PREPARATION AND ION-ASSISTED DEPOSITION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF EROSION-RESISTANT ION-PLASMA COATING

In this article, we investigated the influence of methods for preparing the sample surface before coating on the resistance to erosive wear of an ion-plasma coating of zirconium nitride. The effect on the structure of the zirconium nitride and erosion resistance of the compositions of «alloy–coating» assisted deposition, as well as the direction of rotation of the cathode spots of the vacuum arc along the annular trajectory on the surface of the cylindrical cathode is shown compared to the direction of rotation of the processed products on the planetary drive of the MAP-3 for ion-plasma coatings. The phase composition of the coatings were studied, the lattice periods and the size of coherent scattering regions, the magnitude of residual stresses were determined, and the erosion-wear resistance of «alloy–coating» compositions was tested. The influence of the studied process parameters on the erosion resistance of the ion-plasma coating of zirconium nitride has been established.

Keywords: ion-plasma coatings, erosion-resistant coatings, ion-assisted deposition, coating for compressor blades.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Защитные покрытия, полученные физическими методами осаждения, такими как магнетронное или катодное распыление, в настоящее время широко применяются для защиты поверхности как ответственных деталей газотурбинного двигателя (ГТД) [1, 2],

так и для упрочнения деталей режущего и медицинского инструмента, деталей трения и в качестве декора металлической поверхности. Эрозионностойкие ионно-плазменные покрытия (ИП-покрытия) на основе нитридов титана или циркония находят применение для защиты стальных и титановых лопаток компрессора вертолетного ГТД от пылевоздушного износа. Стойкость к эрозионному износу ИП-покрытия, сформированного вакуумно-дуговым способом (осаждением плазмы материала покрытия, генерируемой катодными микропятнами вакуумной дуги), зависит от нескольких параметров технологического процесса при нанесении нитридов металлов. Обычно, в зависимости от решаемых задач, технология нанесения любого ИП-покрытия может изменяться, но в основном она состоит из следующих этапов. На первом этапе происходит подготовка подложки (поверхности деталей), что необходимо для очистки подложки от загрязнений, либо для придания ей определенных свойств (поверхностный наклеп, изменение шероховатости). Далее идет основная стадия нанесения ИП-покрытия, т. е. его конденсация из плазмы вакуумной дуги на поверхность детали. Ключевыми и общеизвестными характеристиками при этом являются: ток дуги (от 70 до 750 А – в зависимости от конструкции оборудования и особенностей процесса); потенциал смещения на деталях (приложенное отрицательное напряжение от 0 до 1000 В – в зависимости от процесса); давление реактивного газа и конечное время технологического процесса, которое определяет толщину сформированного конденсата. При этом формируются фазы стехиометрического состава с преобладанием ковалентной связи и обедненные фазы с преобладанием металлической связи, что сказывается на значениях модуля упругости и микротвердости получаемых покрытий. При нанесении керметных покрытий на основе нитридов и карбидов металлов происходит так называемый плазмохимический синтез, когда на поверхности деталей в вакуумной камере формируются нитрид или карбид на основе металла токопроводящего материала (материала катода) и подаваемого в камеру реакционного газа (азота, ацетилена или аргона). Известно, что дополнительная бомбардировка обрабатываемой поверхности при нанесении покрытия высокоэнергетичными (20–40 кэВ и более) ионами инертного или реактивного газа позволяет изменять структурно-фазовое состояние покрытия, а в ряде случаев значительно повышает свойства упрочняющих покрытий [3]. Это так называемый процесс ассистированного осаждения, реализованный на установке МАП-3, разработанной и изготовленной во ФГУП «ВИАМ» (рис. 1). Ионный ускоритель (имплантор) на установке МАП-3 расположен в области нанесения покрытий и направлен по касательной к планетарному приводу вращения обрабатываемых изделий. При этом поверхность деталей подвергается бомбардировке ионами высоких энергий (до 40 кэВ) периодически, когда при их вращении вокруг катода установки детали попадают в зону воздействия ионного пучка [4].

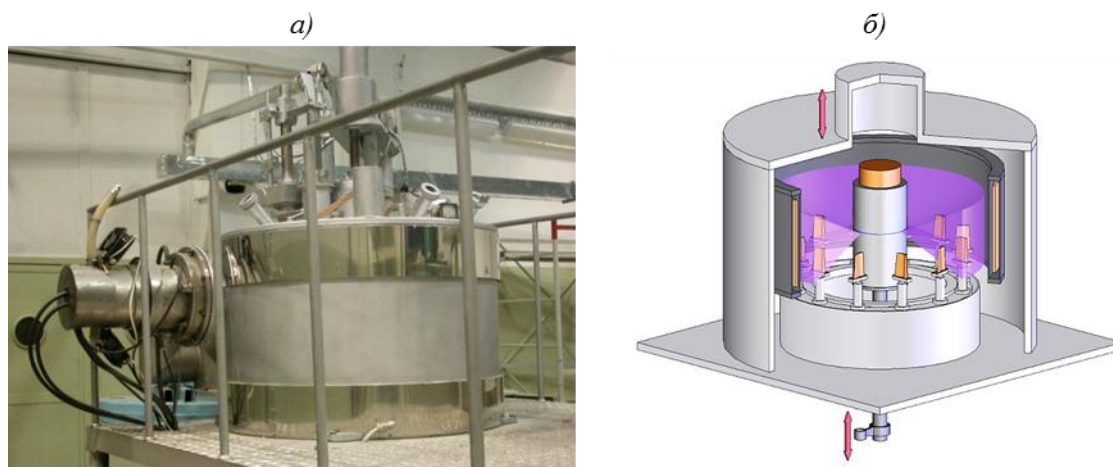


Рис. 1. Внешний вид установки МАП-3 с ионным ускорителем «ПИОН» (а) и принципиальная схема установок МАП с радиальным плазменным потоком вакуумно-дуговой плазмы (б)

Ионная имплантация обрабатываемой поверхности при ассистированном осаждении в установке МАП-3 носит периодический характер. В отличие от ионной имплантации, которая воздействует на подложку (обрабатываемую поверхность) на глубину 0,5–2 мкм путем создания дефектности кристаллической решетки поверхностных слоев, при ассистированном осаждении воздействие на растущий конденсат идет послойно [5].

Направление вращения катодных пятен вакуумной дуги по кольцевой траектории на поверхности цилиндрического катода по сравнению с направлением вращения обрабатываемых изделий на планетарном приводе установки является одним из технологических параметров (режимов осаждения), обычно не учитываемых при создании технологических процессов нанесения ИП-покрытий на установках типа МАП с радиальным плазменным потоком вакуумно-дуговой плазмы. Вращение и фиксация катодных пятен обеспечивается электромагнитной катушкой внутри катодной оправки. Катодные пятна (очаги испарения материала катода) двигаются поперек тангенциальной составляющей магнитного поля катушки, что позволяет фиксировать вакуумную дугу и обеспечивать равномерный радиальный поток плазмы испаряемого материала. Обычно, в зависимости от сечения провода в катушке и стандартных параметров процесса (технологических режимов нанесения), для устойчивой фиксации катодных пятен вакуумной дуги устанавливают ток порядка 1–2 А. В зависимости от направления тока в катушке можно обеспечить вращение катодных пятен вакуумной электрической дуги по часовой или против часовой стрелки, соответственно по или против направления вращения планетарного привода перемещения обрабатываемых деталей.

В данной статье рассмотрены вопросы влияния таких составных частей процесса нанесения керметного упрочняющего ИП-покрытия, как подготовка поверхности подложки (деталей), применение ассистированного осаждения, варьирование направления магнитного поля фиксатора электрической дуги (катодной катушки) на структуру керметного покрытия из нитрида циркония.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных проблем 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» и 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6].

Материалы и методы

В качестве подложки для нанесения ИП-покрытий использовали квадратные плоские образцы из титанового сплава ВТ6. Подготовку поверхности проводили с помощью пескоструйной камеры типа АК-230, виброгалтовочной и виброполировальной машин фирмы ROESLER. В данной работе применяли стандартную подготовку поверхности в виде пескоструйной обработки электрокорундом, обработки поверхности стеклянными микросферами (микросферами), виброполировки поверхности образцов цилиндрическими керамическими телами с небольшой амплитудой вибрации и виброгалтовки образцов треугольными керамическими телами с увеличенной амплитудой вибрации. Обычно виброполировка поверхности применяется для снижения шероховатости, тогда как виброгалтовка позволяет оказывать более сильное влияние на поверхность, создавая наклеп [7, 8], что может улучшить сопротивление усталости деталей. Обработка стеклянными микросферами также позволяет создать уровень наклепа на поверхности, в отличие от пескоструйной обработки корундом, применяемой в основном для грубой очистки и активации поверхности (развитая шероховатая поверхность обеспечивает повышение адгезии покрытия). В качестве эрозионностойкого покрытия выбран монослойный нитрид циркония, серийно используемый в качестве покрытия на лопатках компрессора. В качестве сплава для покрытия использовали сплав Э-110 (Zr-1Nb). Параметры

процесса, такие как ток дуги, напряжение смещения, давление в камере (состояние вакуума), продолжительность нанесения покрытия, устанавливали для всех образцов одинаковыми в соответствии с серийно используемыми режимами нанесения (за исключением параметров ассистированного осаждения). Для процесса ассистированного осаждения использовали аргон на устойчивом режиме работы ионного ускорителя, обеспечивающем энергию ионов аргона ~30 кэВ. Исследования фазового состава (РФА) и текстуры образцов проводили методом рентгеновской дифракции на многофункциональном дифрактометре EMPYREAN. Регистрация дифрактограмм проведена в монокроматическом $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении в геометрии Брегга–Брентано с шагом $\Delta 2\theta=0,016$ градусов и выдержкой 30 с на точку. Расшифровка дифрактограмм проведена с помощью специализированной программы HighScore и базы данных PDF-2. Рентгеновскую съемку производили в диапазоне углов $2\theta=10\div 140$ градусов. Испытания на стойкость к эрозионному износу проводили на лабораторной установке и по методике ФГУП «ВИАМ» при углах атаки газоабразивного потока 70 и 20 градусов, давлении воздушной струи 3 ат (0,3 МПа), продолжительности цикла 2 мин, масса абразива (кремниевый песок Люберецкого карьера) составляла 1,2 кг на 3 цикла испытаний. В случае повреждения покрытия испытания прекращали. Эрозионный износ определяли весовым методом, относительно весового уноса образцов без покрытия, и по внешнему виду образцов. Исследование микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10, оснащенный энергодисперсионным спектрометром X-Max, при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе пучка 1,1 нА. Получены изображения микроструктуры поверхности в режиме отраженных электронов при увеличениях $\times 250$, $\times 700$ и $\times 5000$. Изображения зерен покрытия получены методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). В табл. 1 приведены образцы с ионно-плазменным покрытием на основе нитрида циркония с различными видами подготовки поверхности, нанесенным на установке МАП-3 с фиксированными параметрами тока дуги и напряжения смещения – с ассистированным (ионы аргона) и обычным осаждением при разных направлениях вращения катодных пятен вакуумной дуги.

Таблица 1

Покрывтие ZrN на сплаве ВТ6, нанесенное на поверхность с различными типами подготовки

Условный номер образца	Тип подготовки поверхности	Направление перемещения**
1	Пескоструйная обработка	Катодные пятна и привод перемещения деталей вращаются по часовой стрелке
2	Обдувка стеклянными микрошариками	
3	Виброполировка	
4	Виброгалтовка	
5	Пескоструйная обработка+АО*	
6	Обдувка стеклянными микрошариками+АО	
7	Виброполировка+АО	
8	Виброгалтовка+АО	
9	Пескоструйная обработка	
10	Обдувка стеклянными микрошариками	
11	Виброполировка	
12	Виброгалтовка	
13	Пескоструйная обработка+АО	
14	Обдувка стеклянными микрошариками+АО	
15	Виброполировка+АО	
16	Виброгалтовка+АО	

* Ассистированное осаждение ионами аргона.

** Направление вращения катодных пятен вакуумной дуги по кольцевой траектории на поверхности цилиндрического катода по сравнению с направлением вращения обрабатываемых изделий на планетарном приводе установки.

Результаты

Металлографические исследования полученных образцов с покрытием из нитрида циркония показали, что его толщина составляет ~ 30 мкм. Микроструктуры покрытия приведены на рис. 2.

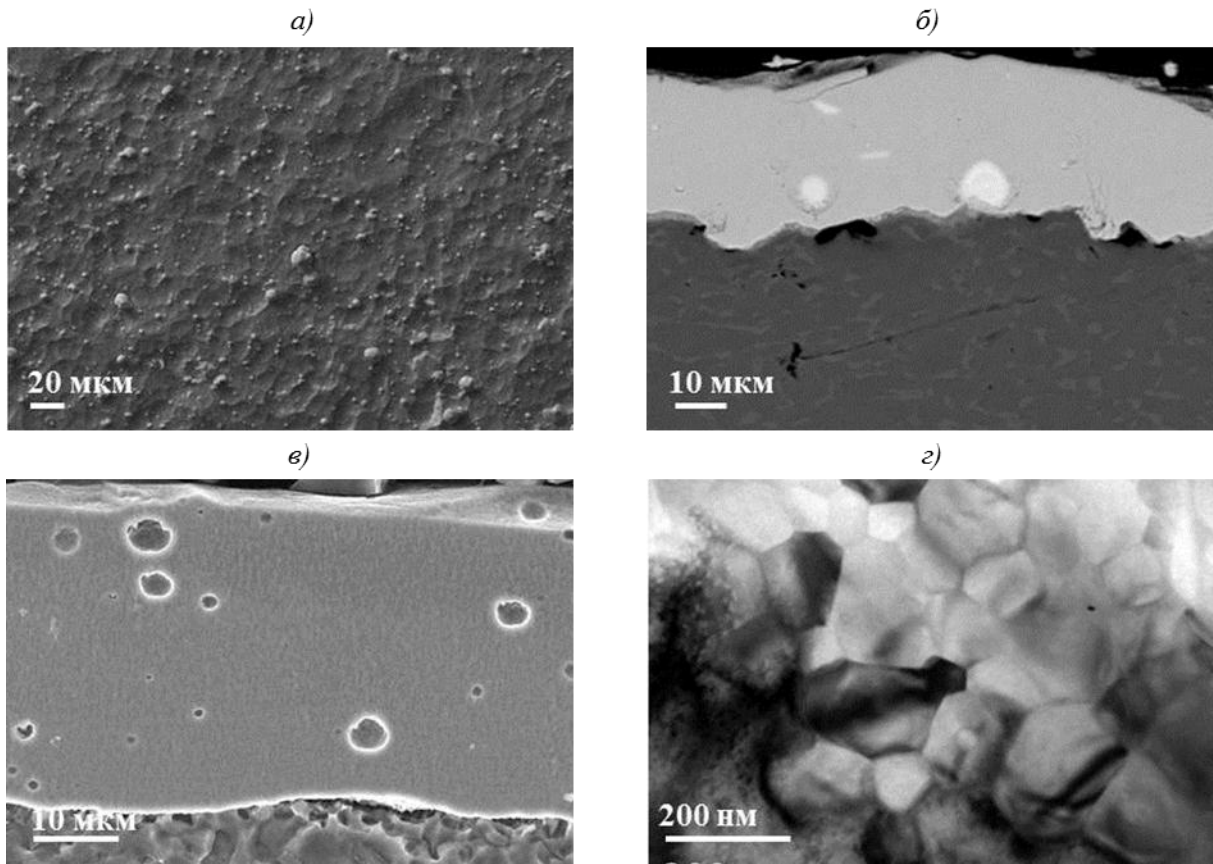


Рис. 2. Микроструктуры поверхности покрытия ZrN на образцах из сплава ВТ6 (подготовка поверхности – пескоструйная обработка):

а – морфология поверхности ($\times 700$, режим вторичных электронов); *б* – поперечный шлиф ($\times 1000$, режим обратноотраженных электронов); *в* – поперечный шлиф (режим вторичных электронов); *г* – сечение, параллельное поверхности (ПЭМ)

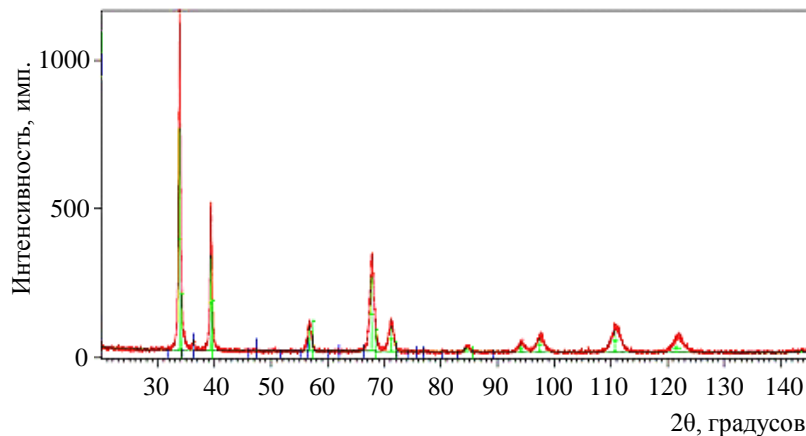


Рис. 3. Рентгенограмма образца из сплава ВТ6 с покрытием ZrN (■) (присутствует нитрид Zr_2N (■))

Основной фазой в нанесенных покрытиях, по данным РФА, является кубический нитрид циркония ZrN , в небольшом количестве присутствует низший нитрид Zr_2N (рис. 3).

Проведено исследование текстуры исходного образца из сплава ВТ6 без обработки и образца 5 (табл. 2) после пескоструйной обработки методом построения прямых полюсных фигур (ППФ) для кристаллографических направлений (100), (101), (102) и (110). Лист из титанового сплава ВТ6, использованный в качестве подложки, имеет характерную текстуру прокатки. Для титанового листа после пескоструйной обработки вид полюсных фигур с равномерным распределением полюсной плотности свидетельствует об отсутствии текстуры в поверхностном слое образца (рис. 4, а).

Покрытие ZrN сформировано субмикронными зёрнами, вытянутыми в направлении, перпендикулярном поверхности; столбчатая структура прослеживается по всей толщине покрытия. При осаждении покрытия из нитрида циркония во всех исследованных образцах формируется аксиальная текстура с осью 311 (рис. 4, б), т. е. это направление является предпочтительным направлением роста зёрен. Присутствует также вторая компонента $(311)\langle 741 \rangle$ [9]. Таким образом, подложка не оказывает ориентационного влияния на текстуру покрытия.

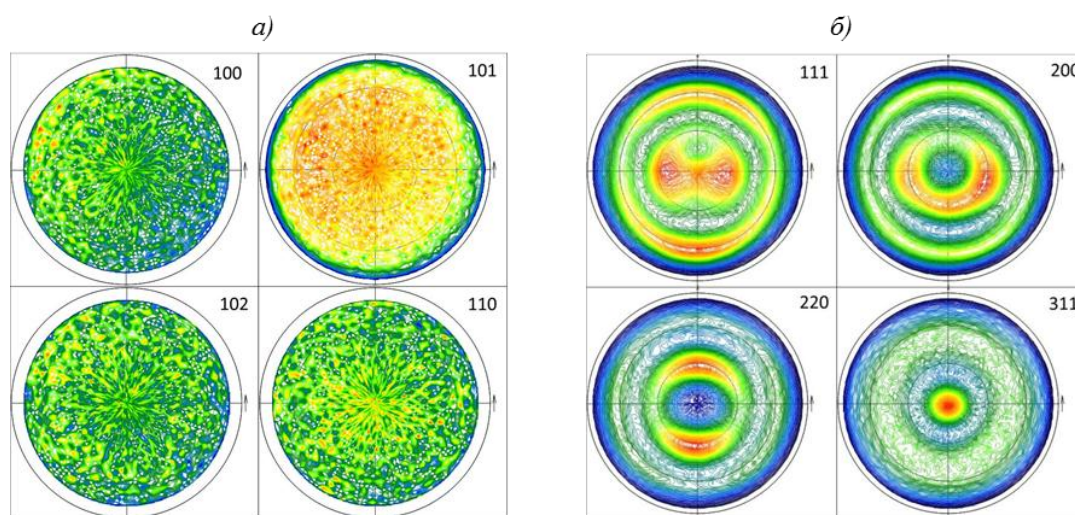


Рис. 4. Прямые полюсные фигуры образца из сплава ВТ6 (аксиальная текстура) после пескоструйной обработки без покрытия (а) и с покрытием ZrN (б – образец 1, см. табл. 2)

В направлении, параллельном поверхности, зёрна ZrN – равноосные, размером от 50 до 250 нм (рис. 2, з). Интегрально размер зёрна в продольном направлении – при различных видах обработки поверхности и ассистированном осаждении – можно оценить с применением полнопрофильного метода Ритвельда по размеру областей когерентного рассеяния (ОКР) в покрытии (табл. 2).

В среднем размер ОКР составляет от 250 до 450 нм, максимальное и минимальное значение ОКР получено при эксперименте с вращающимися против часовой стрелки катодными пятнами вакуумной дуги. Среднее значение ОКР составляет 250–300 нм для образцов, полученных при вращении катодных пятен вакуумной дуги по часовой стрелке.

Показано, что на период решетки формирующегося покрытия оказывает влияние как вид подготовки поверхности, так и ассистированное осаждение. Самый низкий период решетки 0,4584 нм получен на образце 14 (табл. 2), а самый высокий 0,4589 нм – на образце 12 после виброгалтовки.

Периоды решетки и области когерентного рассеяния (ОКР) для покрытия ZrN на сплаве ВТ6, нанесенного на образцы с различными вариантами подготовки поверхности

Условный номер образца	Тип подготовки поверхности	Период решетки, нм	ОКР, нм
Катодные пятна и привод перемещения деталей вращаются по часовой стрелке			
1	Пескоструйная обработка	0,4585	260
2	Обдувка стеклянными микрошариками	0,4585	280
3	Виброполировка	0,4585	280
4	Виброгалтовка	0,4585	340
5	Пескоструйная обработка+АО*	0,4586	285
6	Обдувка стеклянными микрошариками+АО	0,4586	290
7	Виброполировка+АО	0,4585	375
8	Виброгалтовка+АО	0,4588	260
Катодные пятна вращаются против часовой стрелки, привод перемещения деталей вращается по часовой стрелке			
9	Пескоструйная обработка	0,4586	320
10	Обдувка стеклянными микрошариками	0,4586	280
11	Виброполировка	0,4587	305
12	Виброгалтовка	0,4589	320
13	Пескоструйная обработка+АО	0,4587	390
14	Обдувка стеклянными микрошариками+АО	0,4584	270
15	Виброполировка+АО	0,4585	445
16	Виброгалтовка+АО	0,4585	243

* Ассистированное осаждение ионами аргона.

При вращении катодных пятен вакуумной дуги против часовой стрелки на подложках после обдувки стеклянными микрошариками и виброгалтовки наблюдалось расслоение вдоль плоскости поверхности образца и скол верхнего слоя покрытия в поперечном направлении толщиной $\sim(10-15)$ мкм (рис. 5).

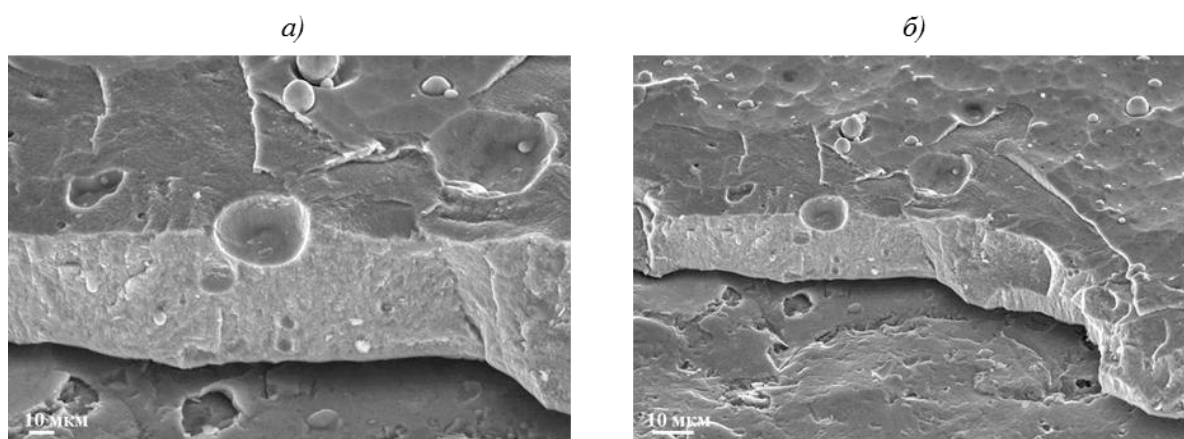


Рис. 5. Скол верхнего слоя покрытия ZrN

Проведено определение остаточных напряжений методом « $\sin^2\psi$ ». Съемку выполняли вдоль и поперек направления прокатки. На рис. 6 приведены результаты определения остаточных напряжений.

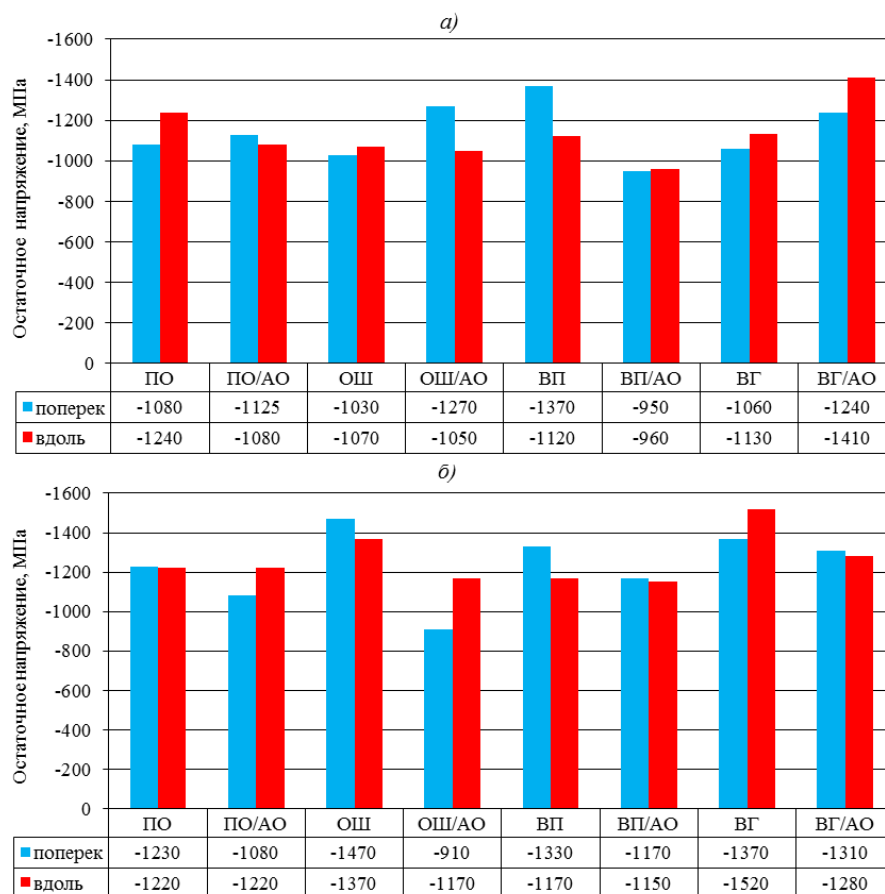


Рис. 6. Остаточные напряжения в нитриде циркония, нанесенного при вращении катодных пятен по часовой стрелке согласно вращению планетарного привода с деталями (а) и против часовой стрелки, т. е. навстречу вращению привода с деталями (б), после различных типов подготовки поверхности образцов: ПО – пескоструйная обработка; АО – ассистированное осаждение ионами аргона; ОШ – обдувка стеклянными микрошариками; ВП – виброполировка; ВГ – виброгалтовка

Все измеренные напряжения являются сжимающими. Максимальный уровень сжимающих напряжений в серии из четырех образцов определен преимущественно на образцах с предварительной виброгалтовкой. В целом более высокий уровень остаточных напряжений определен для серии покрытий, нанесенных без ассистированного осаждения, против часовой стрелки вращения катодных пятен вакуумной дуги. Для выявления влияния различных видов подготовки поверхности и параметров ионно-плазменной технологии на свойства упрочняющего покрытия ZrN проведены испытания на стойкость к эрозионному износу. Результаты испытаний приведены на рис. 7.

По результатам испытаний на эрозионную стойкость установлено, что значения эрозионного износа покрытия из нитрида циркония с различными видами обработки поверхности составляют, отн. ед.: 0,014–0,125 – по касательному износу (20 градусов); 0,041–0,382 – при лобовом ударе (70 градусов), исключая образцы 10 и 12 (табл. 2), нанесенные при вращении катодных пятен вакуумной дуги против часовой стрелки, на которых произошло разрушение покрытия после третьего цикла испытаний. Относительный эрозионный износ основы без покрытия принимается за единицу. По абсолютным значениям лучшая стойкость к эрозионному износу, особенно при лобовом ударе (70 градусов), наблюдается в случае предварительной обработки поверхности стеклянными микрошариками и виброполировкой (0,041–0,072 отн. ед.) перед нанесением покрытия. В целом можно сделать вывод, что наиболее высокие результаты по эрозионной стойкости получены на образцах с покрытиями, нанесенными при вращении катодных

пятен по часовой стрелке согласно вращению привода с деталями по часовой стрелке. На рис. 8 приведено соотношение значений относительного эрозионного износа при лобовом и касательном воздействии. Чем ближе соотношение эрозионных износов, полученных при лобовом и касательном воздействии, к единице, тем более изотропными свойствами по эрозионной стойкости обладает покрытие. Приведенные данные также подтверждают, что для получения более высоких результатов по эрозионной стойкости необходимо обеспечить направление вращения катодных пятен вакуумной дуги по кольцевой траектории на поверхности цилиндрического катода одинаковое с направлением вращения планетарного привода с деталями.

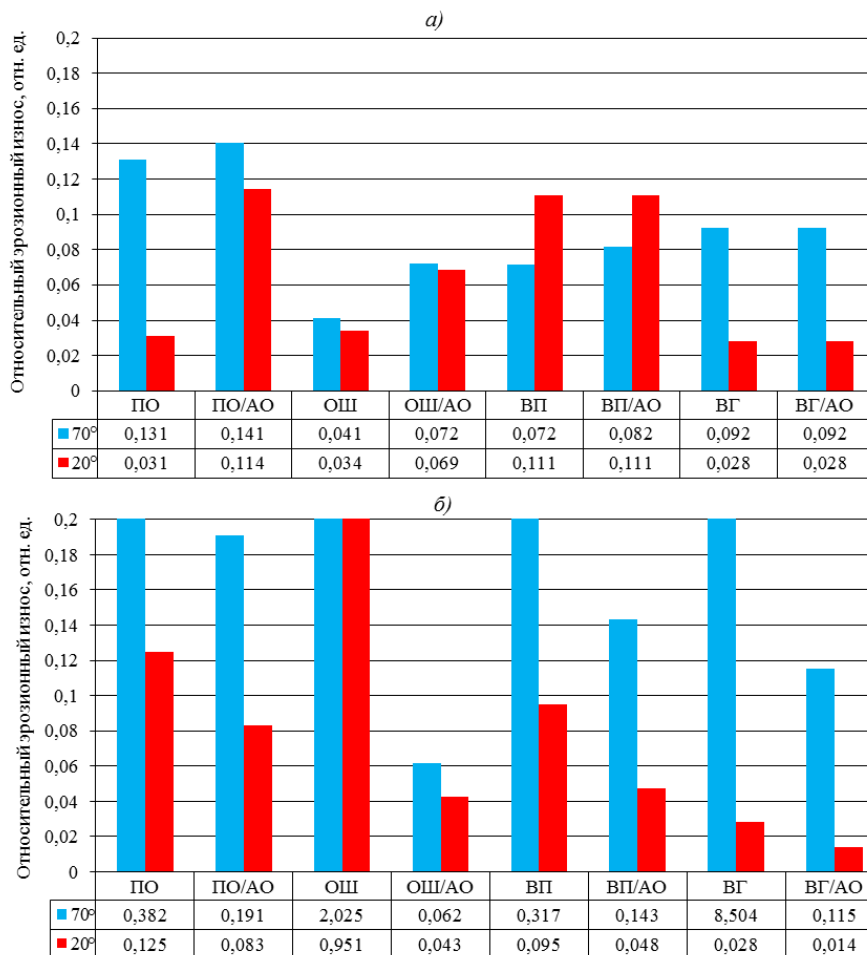


Рис. 7. Относительный эрозионный износ покрытия ZrN, нанесенного при вращении катодных пятен по часовой стрелке согласно вращению планетарного привода с деталями (а) и против часовой стрелки, т. е. навстречу вращению привода с деталями (б), после различных типов подготовки поверхности образцов (см. подпись к рис. 6)

Обсуждение и заключения

Анализ результатов проведенного исследования показывает, что на стойкость к эрозионному износу монослойного покрытия типа ZrN, помимо основных параметров технологического процесса, таких как ток дуги, напряжение электрического смещения (потенциал) на деталях, давление реактивного газа в камере, значительное влияние оказывают: способ подготовки поверхности деталей перед нанесением покрытия; осаждение, ассистированное ионами аргона, и направление вращения катодных пятен вакуумной дуги. Отметим, что решающего влияния ассистированного осаждения на эрозионную стойкость монослойного покрытия типа ZrN, в отличие от нанослойных покрытий

типа TiN/CrN, описанных в работе [4], не наблюдается (при вращении катодных пятен по часовой стрелке согласно вращению привода с деталями по часовой стрелке) – см. рис. 7, а. Четкая тенденция улучшения эрозионной стойкости, независимо от предварительной подготовки поверхности, за счет применения ассистированного осаждения наблюдается в случае, когда покрытие нанесено при вращении катодных пятен против часовой стрелки согласно вращению привода с деталями по часовой стрелке – см. рис. 7, б. Следует также отметить, что ассистированное осаждение позволяет получить более изотропную структуру покрытия ZrN (см. рис. 8, а) [10], когда соотношение относительного эрозионного износа при касательном и лобовом ударе стремится к единице, что можно наблюдать на образцах с пескоструйной обработкой поверхности и в меньшей степени – на образцах, обработанных микрошариками. Изотропность свойств эрозионностойкого покрытия, получаемого при помощи ассистированного осаждения, позволяющая ему в одинаковой мере противостоять как касательному, так и лобовому износу, является существенным фактором при разработке технологии, поскольку лопатка компрессора испытывает оба воздействия. В этом состоит преимущество керметных покрытий, получаемых на установке МАП-3. В отличие от предыдущего поколения покрытий, получаемых на установках типа «Булат» с торцевым катодом, на которых формировалась более острая текстура <111> и снижалась стойкость покрытий типа TiN и ZrN к касательному воздействию пылевоздушного потока, показано, что при ассистированном нанесении формируется нитрид циркония преимущественно с текстурой <311> и подложка (текстура подложки) не оказывает ориентационного влияния на формирование текстуры покрытий.

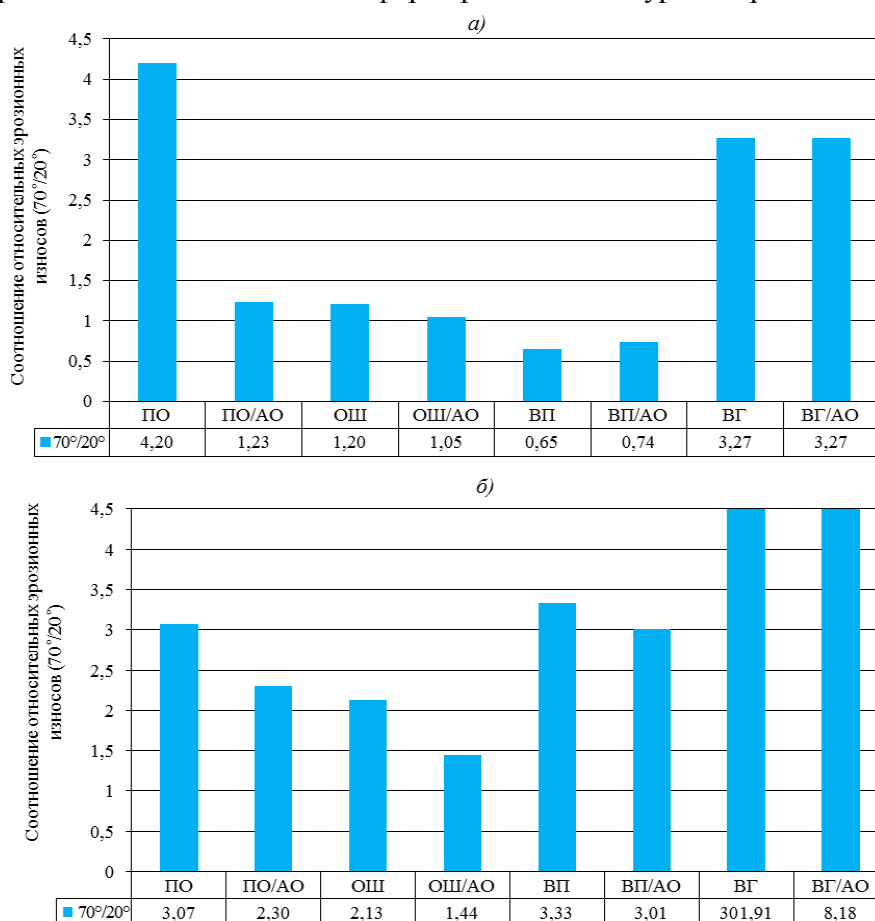


Рис. 8. Соотношение относительных эрозионных износов (70°/20°) покрытия ZrN, нанесенного при вращении катодных пятен по часовой стрелке согласно вращению планетарного привода с деталями (а) и против часовой стрелки, т. е. навстречу вращению привода с деталями (б), после различных типов подготовки поверхности образцов (см. подпись к рис. 6)

Предварительные виброполировка и виброгалтовка поверхности оказывают большее влияние на газоабразивную стойкость, чем ассистированное осаждение покрытия. В общем случае противоположное (против часовой стрелки) вращение катодных пятен вакуумной дуги скорее ухудшило результаты по эрозионной стойкости, вплоть до скола покрытия на образцах 10 и 12 (табл. 2), что подтверждается также чрезвычайно высоким уровнем остаточных напряжений: 1370–1400 МПа. Показано, что направление вращения катодных пятен по часовой стрелке, совпадающее с направлением вращения привода с деталями, является наиболее желательным для получения высоких результатов эрозионной стойкости покрытия. Данный эффект влияния направления вращения катодных пятен вакуумной дуги относительно планетарного привода с деталями можно объяснить за счет разных углов падения ионов испаряемого материала на поверхность подложки. Разброс величин сжимающих остаточных напряжений, полученных на образцах в данной работе, составил от 910 до 1470 МПа, что не является высоким для монослойного нитридного покрытия. По литературным источникам [11–15] для монослойных покрытий на режущем инструменте получают уровень сжимающих напряжений 3000–4000 МПа, что является слишком высоким значением для обеспечения эрозионной стойкости. Оптимальным уровнем остаточных напряжений сжатия для поддержания многократной эрозионной стойкости является 950–1100 МПа [4]. При снижении уровня остаточных напряжений в покрытии происходит и снижение эрозионной (газоабразивной) стойкости, главным образом при лобовом воздействии газоабразивного потока, так как происходит уменьшение адгезионной прочности покрытия. При касательном воздействии пылевоздушного потока более важное значение уже имеет когезионная прочность покрытия, так как вектор удара частиц направлен по касательной и не оказывает сильного энергомеханического воздействия на границу раздела «основа–покрытие».

Полученные результаты необходимо учитывать при разработке технологий нанесения износ- и эрозионностойких покрытий, где аспект подготовки поверхности, в зависимости от вида защищаемых деталей, может быть достаточно важным, поскольку в значительной степени определяет свойства разрабатываемых покрытий [16, 17]. Например, виброполировка поверхности лопаток компрессора является эффективной подготовкой перед нанесением эрозионностойкого покрытия и при этом не повреждает кромки самой лопатки, в отличие от применения виброгалтовки или пескоструйной обработки, применяемой при нанесении жаростойких покрытий на лопатки турбины ГТД [18–20]. Процесс ассистированного осаждения дает возможность получить более изотропное по эрозионной стойкости покрытие, что позволяет одинаково хорошо сопротивляться как касательному, так и лобовому воздействию пылевоздушного потока, а также улучшать эрозионную стойкость покрытий с более высоким уровнем остаточных напряжений, что является неизбежным при конструировании многофункциональных и многокомпонентных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
2. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // *Директор по маркетингу и сбыту*. 2017. №5–6. С. 40–44.
3. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Горлов Д.С. Повышение свойств упрочняющих ионно-плазменных покрытий при помощи ассистированного осаждения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №7. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.10.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7.

4. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Журавлева П.Л. Упрочнение поверхности титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №2 (51). С. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
5. Valesa S., Brito P. Influence of substrate pre-treatments by Xe⁺ ion bombardment and plasma nitriding on the behavior of TiN coatings deposited by plasma reactive sputtering on 100Cr6 steel // *Materials Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 177. P. 156–163.
6. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
7. Путырский С.В., Арисланов А.А., Артеменко Н.И., Яковлев А.Л. Различные методы повышения износостойкости титановых сплавов и сравнительный анализ их эффективности применительно к титановому сплаву ВТ23М // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №1. С. 19–24. DOI: 10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24.
8. Смыслов А.М., Дыбленко Ю.М., Смыслова М.К. и др. Новая вакуумная установка и технология комбинированной упрочняющей обработки, нанесения покрытий на детали ГТД и энергетических установок // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2013. Т. 17. №1 (54). С. 108–113.
9. Журавлева П.Л., Тренингов И.А., Сбитнева С.В., Алексеев А.А., Горлов Д.С. Исследование структуры однослойных покрытий TiN и многослойных покрытий TiN/ZrN // *Российские нанотехнологии*. 2010. Т. 5. №9–10. С. 112–116.
10. Vasylyev V.V., Kalinichenko A.I., Reshetnyak E.N. Experimental and modeling study on the role of Ar addition to the working gas on the development of intrinsic stress in TiN coatings produced by filtered vacuum-arc plasma // *Thin Solid Films*. 2017. Vol. 642. P. 207–213.
11. Латушкина С.Д., Жижченко А.Г., Посылкина О.И. Вакуумно-дуговые карбонитридтитановые покрытия, осажденные из сепарированных плазменных потоков // *Электронная обработка материалов*. 2015. №4. С. 22–27.
12. Лойко В.А., Семин Е.В. Оценка напряженного состояния дискретных структур упрочняющих покрытий, нанесенных вакуумно-плазменным напылением // *Вестник Полоцкого государственного университета*. Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. 2014. №3. С. 29–34.
13. Shekhtman S.R., Sukhova N.A. Producing multilayer composites based on metal-carbon by vacuum ion-plasma method // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 729. P. 1–4.
14. Vasylyev V.V., Luchaninov A.A., Reshetniak E. et al. Structure and properties of Ti–Al–Y–N coatings deposited from filtered cathodic-arc plasma in gas Ar and N₂ mixture // *2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*. 2017. DOI: 10.1109/NAP.2017.8190206.
15. Vereschaka A.A., Volosova M.A., Batako A.D., Vereshchaka A.S., Mokritskii B.Y. Development of wear-resistant coatings compounds for high-speed steel tool using a combined cathodic vacuum arc deposition // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 84. Issue 5–8. P. 1471–1482.
16. Ovcharenko V.D., Kuprin A.S., Tolmachova G.N., Kolodiy I.V. Deposition of chromium nitride coatings using vacuum arc plasma in increased negative substrate bias voltage // *Vacuum*. 2015. Vol. 117. P. 27–34.
17. Pogrebnjak A.D., Yakushchenko I.V., Bagdasaryan A.A., Bondar O.V. Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti–Hf–Zr–V–Nb)N coatings under different deposition conditions // *Materials Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 147. Issue 3. P. 1079–1091.
18. Косьмин А.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Жаростойкое покрытие для нового перспективного интерметаллидного сплава ВИНЗ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №4. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.10.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-1-1.
19. Чубаров Д.А., Будиновский С.А., Смирнов А.А. Магнетронный способ нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-23-30.
20. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // *Электроталлургия*. 2016. №9. С. 30–41.