



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-5-5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ
ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА
ПОДЛОЖКИ НА СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ПОВЕРХНОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

А.А. Смирнов

С.А. Будиновский
доктор технических наук

П.В. Матвеев

Февраль 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

А.А. Смирнов¹, С.А. Будиновский¹, П.В. Матвеев¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОДЛОЖКИ НА СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Проведены исследования влияния величины отрицательного электрического потенциала (напряжения) подложки на скорость осаждения многокомпонентных никелевых покрытий, полученных ионно-плазменным методом нанесения путем осаждения из плазмы вакуумного дугового разряда с поверхности катодов, изготовленных из сплавов на основе никеля с добавлением хрома, алюминия, тантала, рения, иттрия и гафния, на поверхность образцов из различных жаропрочных литейных никелевых сплавов. Показано, что максимальная скорость травления достигается при подаче на подложку потенциала 350 В. Определены пороговые значения напряжения распыления для всех марок жаропрочных материалов, испытанных в работе. Установлено влияние химического состава плазмы, формируемой в вакууме с поверхности катода, в зависимости от содержания хрома и тугоплавких легирующих элементов в катоде, на значение порога распыления.

Ключевые слова: ионно-плазменная технология, ионное травление, жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС).

A.A. Smirnov, S.A. Budinovsky, P.V. Matveev

Investigation of an impact of a negative electric potential of the substrate on deposition rate of multicomponent nickel coatings on the surface of cast heat-resistant nickel alloys

An impact of a negative electrical potential (voltage) of the substrate on deposition rate of multicomponent Ni-based coatings produced by the cathodic arc physical vacuum deposition from the surface of cathodes made of nickel-based alloys with additives of chromium, aluminum, tantalum, rhenium, yttrium, hafnium on the surface of specimens of various cast heat-resistant nickel alloys was investigated. It was shown that the maximum etching rate could be achieved in case of applying of 350 V potential to a substrate. The threshold values of spray voltage for all compositions of heat-resistant materials tested in this study were determined. An influence of the chemical composition of the plasma formed in vacuum from the cathode surface on the sputtering threshold was stated depending on the content of chromium and high-melting point elements in the cathode.

Keywords: ion-plasma technology, ion etching, high-temperature nickel alloys.

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

Обработка поверхностей деталей ионно-плазменным методом предусматривает использование плазменных потоков вещества с $E_i=1-10^4$ эВ и $j_i=1-10^6$ А/м². Для генерации и управления этими потоками применяют технологические плазменные ускорители различных типов, возможности которых в научных исследованиях и промышленности рассмотрены в работе [1], и промышленные установки на основе стационарных электродуговых эрозионных ускорителей плазмы с расходуемым катодом [2–5]. Генерация потока плазмы осаждаемого вещества в этих устройствах осуществляется в ваку-

умном дуговом электрическом разряде с поверхности катода, изготовленного из материала покрытия (чистого металла или сплава) [6]. Катод эродирует под действием катодных пятен вакуумной дуги, плотность теплового потока в которых достигает $10^9\text{--}10^{10}$ Вт/м², в которых присутствуют твердые и жидкие микрочастицы материала покрытия. Степень ионизации плазмы и доля микрочастиц в потоке определяются как теплофизическими свойствами материала катода, так и условиями горения вакуумной дуги на его поверхности (температура поверхности, наличие загрязнений в материале катода, состав и давление остаточных газов в вакуумной камере и т. д.). Формирование покрытия происходит в процессе конденсации продуктов эрозии катода на поверхности подложки.

Использование для обработки поверхности твердого тела потоков вещества в сильно ионизованном состоянии позволяет достаточно просто управлять энергией конденсирующихся ионов. Полная энергия иона, взаимодействующего с поверхностью твердого тела (подложки), может быть представлена в виде:

$$E_i = E_0 + Z \cdot e \cdot U, \quad (1)$$

где E_0 – энергия иона на границе двойного электрического слоя [7], разделяющего поверхность подложки от плазмы, эВ; Z – кратность заряда иона; e – заряд электрона, Кл; U – разность потенциалов (напряжение) между опорным электродом и подложкой, В.

Варьируя величину отрицательного электрического потенциала подложки, с помощью источника напряжения в цепи «подложка–опорный электрод» можно управлять энергией падающего иона и характером процессов, имеющих место на обрабатываемой поверхности (конденсация, распыление, легирование, нагрев). Причем минимальный уровень энергии иона зависит от значения энергии E_0 , которая по данным работ [8–10] определяется условиями генерации плазмы на катоде и для большой группы металлов изменяется в пределах от 20 до 70 эВ.

Таким образом, ионно-плазменный технологический процесс благодаря управлению энергией ионов, взаимодействующих с подложкой, при осаждении покрытий из плазмы вакуумного дугового разряда обладает рядом важных преимуществ. В первую очередь – это возможность проводить ионное травление покрываемой поверхности, что затем позволяет наносить покрытия на поверхность, очищенную от загрязнений на атомном уровне.

По данным работы [11] пороговые значения энергии ионов, бомбардирующих поверхность, при которых наблюдается начало ее распыления, составляет ~10 эВ, а интенсивный характер распыления приобретает при энергиях ионов в сотни эВ. При $U=0$ В энергия ионов составляет несколько десятков вольт и получает незначительное приращение в двойном электрическом слое, отделяющем подложку от плазмы. При подаче на подложку потенциала 30–50 В приращение энергии иона в двойном слое обеспечивает величину полной энергии конденсирующегося иона заметно больше пороговой энергии распыления металлической подложки, что ведет к снижению скорости осаждения вследствие катодного распыления подложки под действием ионной бомбардировки. Существует пороговое значение величины U , при превышении которого происходит переход от осаждения покрытия к ионному травлению подложки.

Цель данной работы – определение пороговых значений отрицательного электрического потенциала для ряда новых жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) и сплавов для нанесения новых покрытий. Данная характеристика необходима для разработки промышленных ионно-плазменных технологических процессов нанесения покрытий на лопатки турбин перспективных ГТД для их защиты от высокотемпературного окисления.

Материалы и методы

Образцы для испытаний изготавливали из отливок с монокристаллической структурой (кроме сплава ВЖЛ21 для равноосного литья) без проведения дополнительной термообработки, составы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав жаропрочных литейных никелевых сплавов (средние значения)

Сплав	Содержание легирующего элемента, % (по массе)									Литературный источник
	Cr	Ti	Al	Co	Mo	W	Nb	Ta	Re	
ВЖЛ21	8,3	3,5	5,3	9,9	3,8	2,8	–	2,5	–	[12]
ВКНА1В	5,5	1,7	8,8	–	3,7	3,6	–	–	–	[13]
ВКНА25	4,9	0,7	8,6	4,5	5	3,6	–	–	1,5	[14]
ВИН3	3,5	–	8,4	5	Σ7		–	Σ7		–
ЖС32	5	–	6	9	1,1	8,5	1,6	4	4	[15]
ВЖМ5У	4,5	0,8	5,9	9	1,9	Σ16				–
ВЖМ4*	2,7	–	6	6	4	–	–	4,5	6	[16]
ReneN5**	7	–	6	7	1,4	5	–	7	3	[17]

* Сплав содержит 4% Ru.

** Сплав содержит 0,15% Hf.

Исследования по определению пороговых значений распыления в вакууме ЖНС проводились на промышленной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУТП) типа МАП-2, обеспечивающей нанесение широкого спектра защитных высокотемпературных покрытий на изделия из ЖНС [18–29]. Для работ в качестве трубных испаряемых расходоуемых катодов в камере ионно-плазменной установки МАП-2 для формирования металлической плазмы использовали экспериментальные сплавы, составы которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Составы сплавов для трубных катодов

Условный номер сплава*	Содержание элементов, % (по массе)				
	Cr	Al	Ta	Re	Y
1	5–8	11–13	–	–	–
2	10–12	11–13	3–3,5	0,5–1,0	0,2–0,5
3	18–22	11–13	–	0,5–0,8	0,2–0,5

* Сплавы дополнительно легированы гафнием.

Цилиндрические образцы $\varnothing 25 \times 3$ мм из ЖНС для проведения ионно-плазменной обработки в плазме катодов составов 1, 2 и 3 устанавливали в специальную оснастку в вакуумную камеру установки. После откачки высокого вакуума до уровня давления ниже 0,05 Па зажигали вакуумную дугу и проводили обработку поверхности образцов при следующих значениях напряжений смещения, подаваемых на образцы: 350, 250, 150 и 50 В. Остальные параметры режимов ионной обработки поверхности образцов были неизменными: ток дуги 700 А, давление в камере $2,66 \cdot 10^{-2}$ Па ($2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.). После процесса ионной обработки в течение 60 мин на установке МАП-2 образцы взвешивали с точностью 0,0001 г.

Удельное изменение массы образцов после ионно-плазменной обработки в вакууме (Δm_τ (г/м²)) после испытаний продолжительностью τ (ч) рассчитывали по формуле:

$$\Delta m_\tau = (m_\tau - m_0) / S, \quad (2)$$

где m_τ – масса образца после испытаний продолжительностью τ (ч), г; m_0 – масса образца в исходном состоянии, г; S – площадь поверхности образца в исходном состоянии, м².

Результаты

Зависимости удельного изменения массы образцов из ЖНС от величины отрицательного потенциала подложки в процессе ионно-плазменной обработки в установке МАП-2 представлены на рис. 1 и 2. По результатам испытаний определены пороговые значения распыления ЖНС в плазме катодов на никелевой основе (табл. 3).

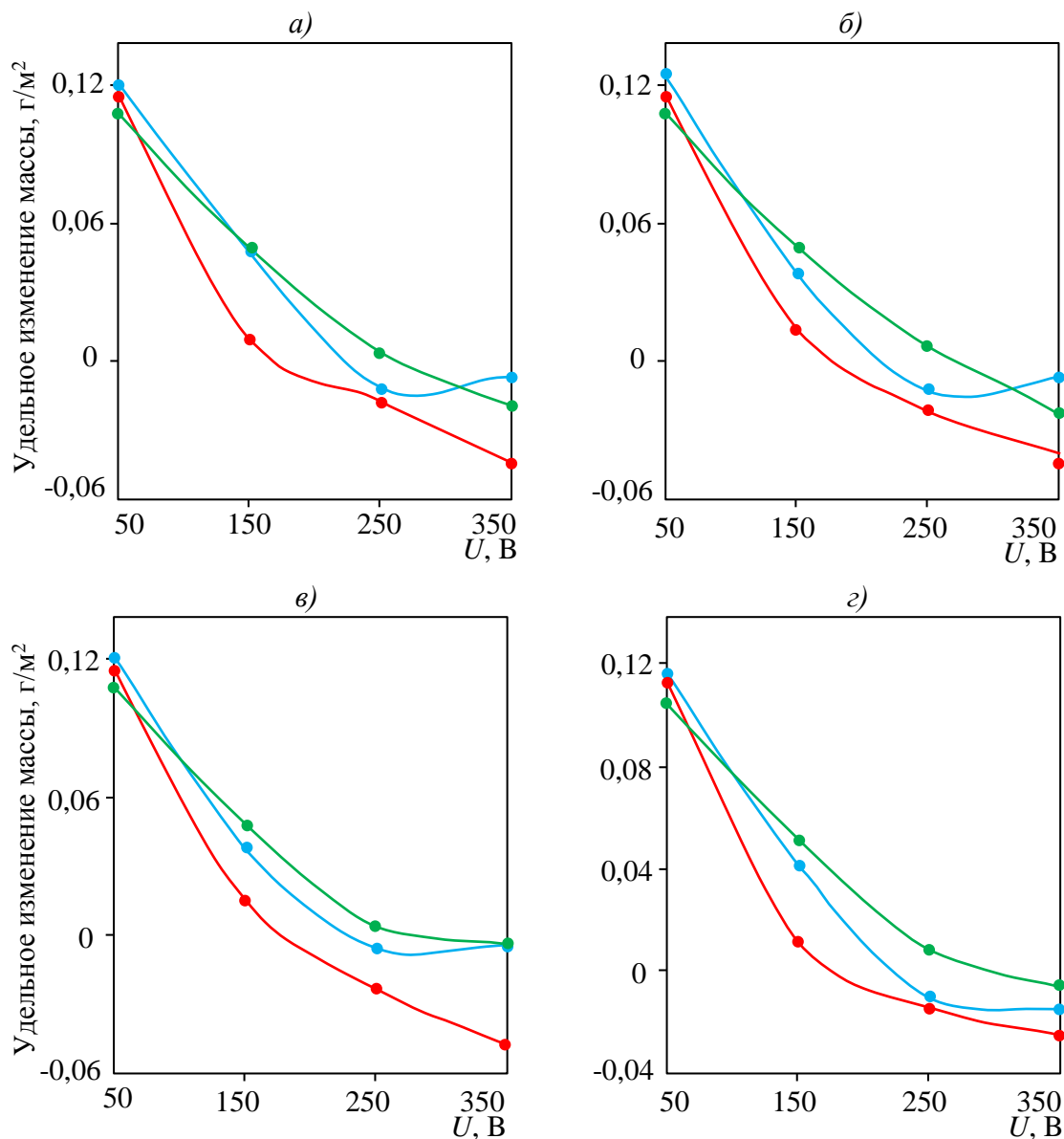


Рис. 1. Зависимости удельного изменения массы образцов из никелевых жаропрочных сплавов ЖС32 (а), ВЖМ4 (б), ВЖМ5У (в) и ВКНА-25 (з) в процессе ионно-плазменной обработки в плазме катодов составов 1 (●), 2 (●), 3 (●) на установке МАП-2

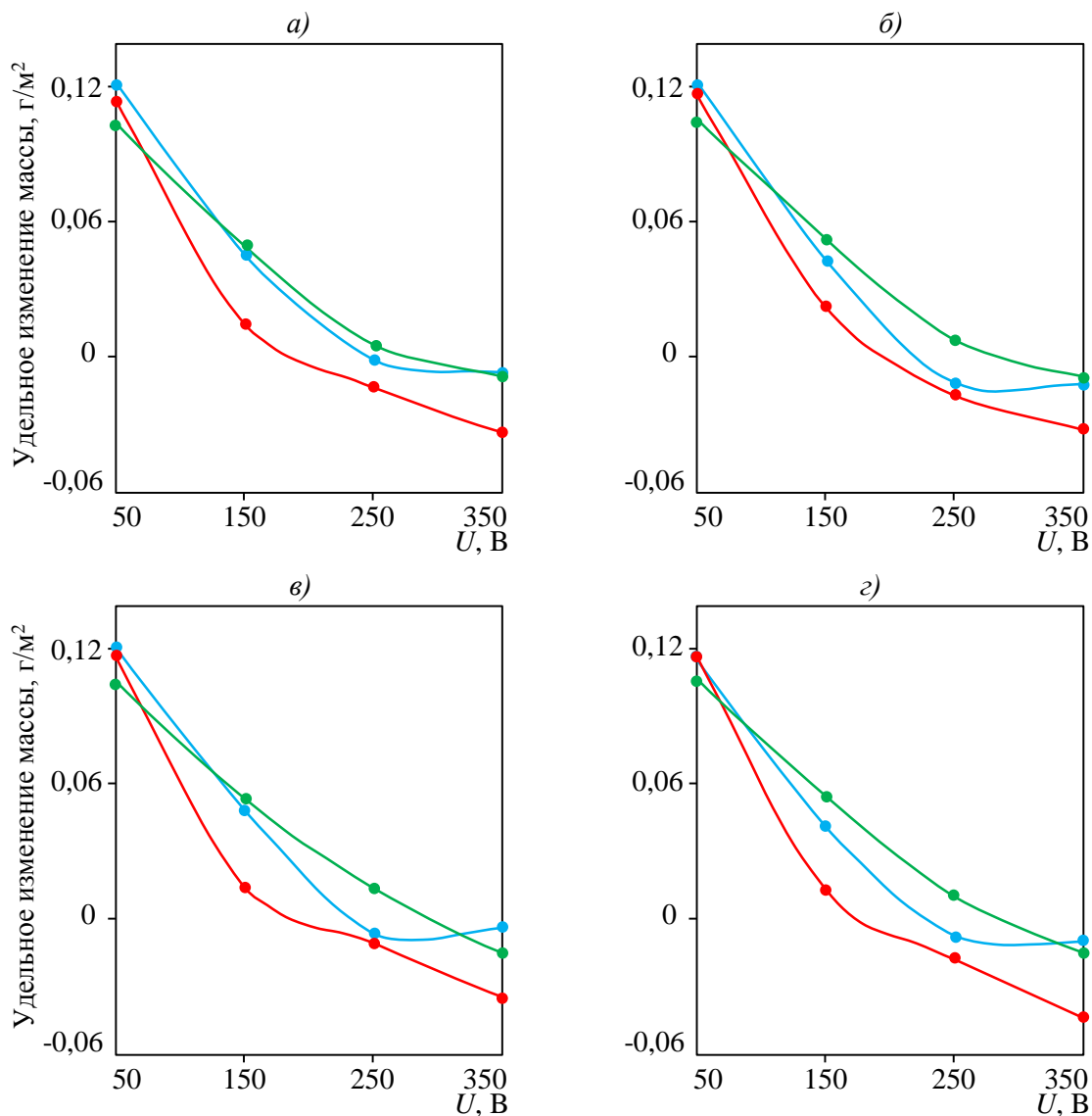


Рис. 2. Зависимости удельного изменения массы образцов из никелевых жаропрочных сплавов ВКНА-1В (а), ВИН3 (б), ВЖЛ21 (в) и Rene N5 (г) в процессе ионно-плазменной обработки в плазме катодов составов 1 (●), 2 (●), 3 (●) на установке МАП-2

Таблица 3

**Пороговые значения напряжения на подложке при распылении ЖНС
в плазме никелевых катодов**

Сплав (ЖНС)	Электрический потенциал (напряжение), В, на подложке при осаждении покрытия в плазме катода из сплава состава		
	1	2	3
ВКНА-25	225	175	295
ВКНА-1В	245	185	275
ЖС32	220	165	265
ВЖМ5У	225	175	270
ВЖМ4	215	175	260
ВИН3	215	195	285
ВЖЛ21	235	185	295
ReneN5	225	175	285

Полученные пороговые значения U начала распыления ЖНС в плазме никелевых катодов необходимы для выбора режимов очистки поверхности деталей ГТД перед нанесением защитных ионно-плазменных покрытий. При величине напряжения смещения, подаваемого на обрабатываемое изделие, выше порогового значения U происходит гарантированное травление поверхности изделия ионами металлов, входящих в состав катода. При уменьшении величины напряжения смещения ниже порогового значения, начинается осаждение ионов металлов и формируется конденсированное покрытие на основе сплава катода.

Наибольшие пороговые значения U получены при использовании катода из сплава 3, в котором количество хрома максимальное среди рассмотренных сплавов для покрытий (до 22%). Возможно, это связано с уменьшением кратности заряда ионов металлов в плазме вакуумного дугового разряда и с катодом из многокомпонентного сплава [8–10].

Обсуждение и заключения

Определены пороговые значения величины электрического потенциала подложки U , при превышении которого происходит переход от осаждения покрытия к ионному травлению подложки из сплавов ЖС32, ВЖМ4, ВЖМ5У, ВКНА-25, ВКНА-1В, ВИНЗ, ВЖЛ21 и Rene N5 в плазме вакуумного дугового разряда трех многокомпонентных никелевых сплавов для перспективных покрытий системы Ni–Al–Cr–Ta–Re–Hf–Y.

Установлено, что величина порогового значения U имеет максимальное значение (~300 В) в случае покрытия с содержанием хрома 18–22%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменные ускорители /Под ред. Л.А. Арцимовича. М.: Машиностроение. 1973. 312 с.
2. Дороднов А.М., Петросов В.А. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств //Журнал технической физики. 1981. Т. 51. №3. С. 504–524.
3. Григоров А.И., Дороднов А.М., Киселев Н.Д. Некоторые физические основы установки ПУСК 77-1 для нанесения износостойких покрытий //Технология автомобилестроения. 1978. №6. С. 10–15.
4. Падалка В.Г., Толоч В.Т. Методы плазменной технологии высоких энергий //Атомная энергия. 1978. Т. 44. №5. С. 476–478.
5. Установка ИЭТ-842 («Булат») //Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. 1980. №3 (211). С. 15–16.
6. Кимблин С.У. Эрозия электродов и ионизационные процессы в приэлектродных областях вакуумных дуг и при атмосферном давлении /В кн. Экспериментальные исследования плазмотронов. Пер. с англ. Новосибирск: Наука. 1977. С. 226–253.
7. Шотт Л. Электрические зонды. Пер. с англ. М.: Мир. 1971. С. 459–505.
8. Лунев В.М., Овчаренко В.Д., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. Часть I //Журнал технической физики. 1977. Т. 47. №7. С. 1486–1490.
9. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. Часть II. Влияние интегральной температуры катода //Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21. №4. С. 646–651.
10. Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. Часть II //Журнал технической физики. 1977. Т. 47. №7. С. 1491–1495.
11. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. Часть I. Формирование потоков плазмы //Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21. №2. С. 219–223.
12. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Висик Е.М., Рассохина Л.И., Тимофеева О.Б. Жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности //Литейное производство. 2012. №6. С. 5–11.

13. Герасимов В.В., Висик Е.М., Бакерин С.В. Изготовление протяженных литых заготовок из сплава ВКНА-1В направленной кристаллизацией //Литейное производство. 2011. №10. С. 36–39.
14. Поварова К.Б., Базылева О.А., Дроздов А.А., Аладьев Н.А., Самсонов М.А. Исследование малоциклового усталости при комнатной температуре сплава на основе интерметаллида Ni_3Al типа ВКНА-25 //Металлы. 2012. №6. С. 70–81.
15. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Косьмин А.А. Жаростойкие ионно-плазменные покрытия для лопаток турбин из никелевых сплавов, легированных рением //МиТОМ. 2008. №6. С. 31–36.
16. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Конакова И.П., Петрушин Н.В., Мубояджян С.А. Структура и фазовый состав монокристаллического сплава ВЖМ-4 с газоциркуляционным защитным покрытием //МиТОМ. 2011. №3. С. 28–32.
17. Морозова Г.И., Тимофеева О.Б., Петрушин Н.В. Особенности структуры и фазового состава высокорениевого никелевого жаропрочного сплава //МиТОМ. 2009. №2. С. 10–16.
18. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
19. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
20. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 12–15.
21. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising gtes //Russian metallurgy (Metally). 2012. №1. P. 1–7.
22. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //МиТОМ. 1995. №2. С. 15–18.
23. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
24. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 01 (viam-works.ru).
25. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).
26. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 3–8.
27. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Конверсия в машиностроении. 1999. №2. С. 42–47.
28. Будиновский С.А., Матвеев П.В., Смирнов А.А. Исследование жаростойкости литейных жаропрочных никелевых сплавов в области температур 1000–1200°C //Авиационная промышленность. 2014. №2. С. 48–52.
29. Смирнов А.А., Будиновский С.А. Анализ эволюции нормальных напряжений в системе «сплав–покрытие» в области температур до 1200°C //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 8–14.

REFERENCES LIST

1. Plazmennyye uskoriteli [Plasma accelerators] /Pod red. L.A. Arcimovicha. M.: Mashinostroenie. 1973. 312 s.
2. Dorodnov A.M., Petrosov V.A. O fizicheskikh principah i tipah vakuumnykh tehnologicheskikh plazmennyykh ustrojstv [On the physical principles and types of vacuum plasma technology devices] //Zhurnal tehnikeskoy fiziki. 1981. T. 51. №3. S. 504–524.

3. Grigorov A.I., Dorodnov A.M., Kiselev N.D. Nekotorye fizicheskie osnovy ustanovki PUSK 77-1 dlja nanesenija iznosostojkih pokrytij [Some physical basics of installing START 77-1 for hardfacing] //Tehnologija avtomobilestroenija. 1978. №6. S. 10–15.
4. Padalka V.G., Tolok V.T. Metody plazmennoj tehnologii vysokih jenergij [Methods of plasma technology of high-energy] //Atomnaja jenergija. 1978. T. 44. №5. S. 476–478.
5. Ustanovka IJeT-842 («Bulat») [Installing IET-842 («Bulat»)] //Jelektrotehnicheskaja promyshlennost'. Ser. Jelektrotermija. 1980. №3 (211). S. 15–16.
6. Kimblin S.U. Jerozija jelektrodov i ionizacionnye processy v prijelektroodnyh oblastjah vakuumnih dug i pri atmosfernom davlenii [Erosion electrodes and ionization processes in the electrode regions of vacuum arcs and at atmospheric pressure] /V kn. Jeksperimental'nye issledovanija plazmotronov. Per. s angl. Novosibirsk: Nauka. 1977. S. 226–253.
7. Shott L. Jelekticheskie zondy [Electrical probes]. Per. s angl. M.: Mip. 1971. S. 459–505.
8. Lunev V.M., Ovcharenko V.D., Horoshih V.M. Issledovanie nekotoryh harakteristik plazmy vakuumnoj metallicheskoj dugi. Chast' I [Study of some characteristics of the plasma vacuum arc metal] //Zhurnal tehnichekoj fiziki. 1977. T. 47. №7. S. 1486–1490.
9. Aksenov I.I., Padalka V.G., Horoshih V.M. Issledovanie plazmy stacionarnogo vakuumnogo dugovogo razrjada. Chast' II. Vlijanie integral'noj temperatury katoda [Investigation of stationary plasma vacuum arc discharge. Part II. Effect of integrated cathode temperature] //Teplofizika vysokih temperatur. 1983. T. 21. №4. S. 646–651.
10. Lunev V.M., Padalka V.G., Horoshih V.M. Issledovanie nekotoryh harakteristik plazmy vakuumnoj metallicheskoj dugi [Study of some characteristics of the plasma vacuum arc metal]. Chast' II //Zhurnal tehnichekoj fiziki. 1977. T. 47. №7. C. 1491–1495.
11. Aksenov I.I., Padalka V.G., Horoshih V.M. Issledovanie plazmy stacionarnogo vakuumnogo dugovogo razrjada. Chast' I. Formirovanie potokov plazmy [Investigation of stationary plasma vacuum arc discharge. Part I. Formation of plasma flows] //Teplofizika vysokih temperatur. 1983. T. 21. №2. S. 219–223.
12. Petrushin N.B., Ospennikova O.G., Visik E.M., Rassohina L.I., Timofeeva O.B. Zharoprochnye nikeljevyje splavy nizkoj plotnosti [Heat-resistant nickel alloys, low density] //Litejnoe proizvodstvo. 2012. №6. S. 5–11.
13. Gerasimov V.V., Visik E.M., Bakerin S.V. Izgotovlenie protjazhennyh lityh zagotovok iz splava VKNA-1V napravlennoj kristallizacii [Manufacturing extended cast billets alloy VKNA-1B directional solidification] //Litejnoe proizvodstvo. 2011. №10. S. 36–39.
14. Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Alad'ev N.A., Samsonov M.A. Issledovanie malociklovoj ustalosti pri komnatnoj temperature splava na osnove intermetallida Ni3Al tipa VKNA-25 [Investigation of low cycle fatigue at room temperature alloy based on the intermetallic compound Ni3Al type VKNA-25] //Metally. 2012. №6. S. 70–81.
15. Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Gajamov A.M., Kos'min A.A. Zharostojkie ionoplazmennye pokrytija dlja lopatok turbin iz nikeljevyh splavov, legirovannyh reniem [Heat-resistant ion-plasma coatings for turbine blades of nickel alloys doped with rhenium] //MiTOM. 2008. №6. S. 31–36.
16. Kuznecov V.P., Lesnikov V.P., Konakova I.P., Petrushin N.V., Mubojadzhan S.A. Struktura i fazovyj sostav monokristallicheskoj splava VZhM-4 s gazocirkuljacionnym zashhitnym pokrytiem [The structure and phase composition of the single crystal alloy VZHM-4 with a gas circulation protective coating] //MiTOM. 2011. №3. S. 28–32.
17. Morozova G.I., Timofeeva O.B., Petrushin N.V. Osobennosti struktury i fazovogo sostava vysokorenievogo nikeljevogo zharoprochnogo splava [Features of the structure and phase composition of the high-nickel nickel superalloy] //MiTOM. 2009. №2. S. 10–16.
18. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Casting nickel superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 36–52.
19. Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-resistant and heat-resistant coatings for high-pressure turbine blades promising GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 60–70.
20. Matveev P.V., Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Kos'min A.A. Zashhitnye zharostojkie pokrytija dlja splavov na osnove intermetallidov nikelja [Protective coatings for heat-resistant alloys based on nickel intermetallic] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 12–15.

21. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising gtes //Russian metallurgy (Metally). 2012. №1. P. 1–7.
22. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //ММТОМ. 1995. №2. С. 15–18.
23. Kablov E.N., Mubojadzhyan S.A., Budinovskij S.A., Lucenko A.N. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinyh dvigatelej [Ion-plasma protective coatings for gas turbine engine blades] //Metally. 2007. №5. S. 23–34.
24. Kablov E.N., Gerasimov V.V., Visik E.M., Demonis I.M. Rol' napravlennoj kristallizacii v resursoberegajushhej tehnologii proizvodstva detalej GTD [The role of directional solidification in the resource-saving technology of production of gas-turbine] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 01 (viam-works.ru).
25. Mubojadzhyan S.A., Lucenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Issledovanie vozmozhnosti povysheniya sluzhebnyh harakteristik lopatok kompressora GTD metodom ionnogo modifitsirovaniya poverhnosti [Possibility of increasing the service characteristics of the compressor blades of GTE ion surface modification] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 02 (viam-works.ru).
26. Mubojadzhyan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Smirnov A.A. Poluchenie keramicheskikh teplozashhitnyh pokrytij dlja rabochih lopatok turbin aviacionnyh GTD magnetronnym metodom [Preparation of ceramic thermal barrier coatings for turbine blades working GTE magnetron sputtering] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 3–8.
27. Kablov E.N., Mubojadzhyan S.A., Budinovskij S.A., Pomelov Ja.A. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinyh dvigatelej [Ion-plasma protective coatings for gas turbine engine blades] //Konversija v mashinostroenii. 1999. №2. S. 42–47.
28. Budinovskij S.A., Matveev P.V., Smirnov A.A. Issledovanie zharostojkosti litejnyh zharoprochnykh nikelovyh splavov v oblasti temperatur 1000–1200°C [Investigation of the heat resistance of the casting heat-resistant nickel alloys in the temperature range 1000–1200°C] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2014. №2. S. 48–52.
29. Smirnov A.A., Budinovskij S.A. Analiz jevoljucii normal'nyh naprjazhenij v sisteme «splav-pokrytie» v oblasti temperatur do 1200°C [Analysis of the evolution of normal stresses in the system «alloy-coating» at temperatures up to 1200°C] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 8–14.