

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-22-26

П.В. Матвеев¹, С.А. Будиновский¹

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ЖАРСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ТИПА ВКНА ДЛЯ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР ДО 1300°C

Исследованы свойства жаростойких покрытий для интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА для их работы при температурах от 1250 до 1300°C. Проведены испытания жаростойкости сплавов с покрытиями. Результаты проведенных исследований показали, что лучшую жаростойкость обеспечивают покрытия ВСДП-4 и СДП-41.

Ключевые слова: покрытия, жаростойкие покрытия, ионно-плазменные покрытия, ионно-плазменная технология, жаростойкость, интерметаллидные сплавы.

Properties of heat-resistant coatings for intermetallic nickel alloys operating at temperatures up to 1250–1300°C were studied. Research of heat-resistance of alloys with coatings was made. Results of research showed that VSDP-4 and SDP-41 coatings have the best heat-resistance.

Keywords: coatings, heat-resistant coatings, ion-plasma coatings, ion-plasma technology, heat-resistance, intermetallic 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

Методы исследования

Испытания на изотермическую жаростойкость проводились по ГОСТ 6130–71 в атмосферной печи (в керамических тиглях с крышками) при температурах 1250 и 1300°C. Оценка жаростойких свойств сплавов с покрытием и без покрытия осуществлялась гравиметрическим методом – путем взвешивания образцов каждые 5–20 ч испытаний и определения изменения удельной массы образцов без учета массы окалины, осыпавшейся с их поверхности.

Металлографические исследования проводились на микроскопе Olympus GX51.

Результаты

В настоящее время одним из направлений комплексного повышения служебных характеристик существующих конструкций газотурбинных двигателей (ГТД) – в том числе продления ресурса работы, снижения массы и повышения рабочих температур – является применение интерметаллидных сплавов на никелевой основе для деталей турбин высокого (ТВД) и низкого давления (ТНД) [1–3]. В ВИАМ разработаны интерметаллидные никелевые сплавы, обладающие удовлетворитель-

ным комплексом механических свойств при температурах до 1200°C на базах испытаний до 1000 ч. Поскольку содержание алюминия в сплавах на основе интерметаллидов никеля выше, чем в серийных жаропрочных сплавах с интерметаллидным упрочнением, они обладают повышенной жаростойкостью на низких базах испытаний, что позволяет использовать их в ряде случаев без защитного покрытия [4]. Однако с ростом рабочих температур в ГТД обеспечение длительных ресурсов для рабочих или сопловых лопаток ТВД и ТНД не представляется возможным. В условиях интенсивных теплосмен обеднение поверхности деталей из интерметаллидных сплавов алюминием и хромом приводит к окислению и разупрочнению и может быть компенсировано применением защитного покрытия [5–9].

Задачей исследования была разработка защитного жаростойкого покрытия на интерметаллидные никелевые сплавы ВКНА-1В и ВКНА-25 для деталей с рабочими температурами от 1250 до 1300°C. Результаты предыдущих исследований показали, что для температур до 1200°C оптимальным является конденсационно-диффузионное жаростойкое покрытие СДП-41+ВСДП-16

Таблица 1

Системы элементов никелевых сплавов, использовавшихся при нанесении жаростойкого покрытия

Сплав	Система
СДП-41	Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf
ВСДП-3	Ni–Cr–Al–Re–Y–Hf
ВСДП-4	Ni–Cr–Al–Hf
ВСДП-16	Al–Ni–Y

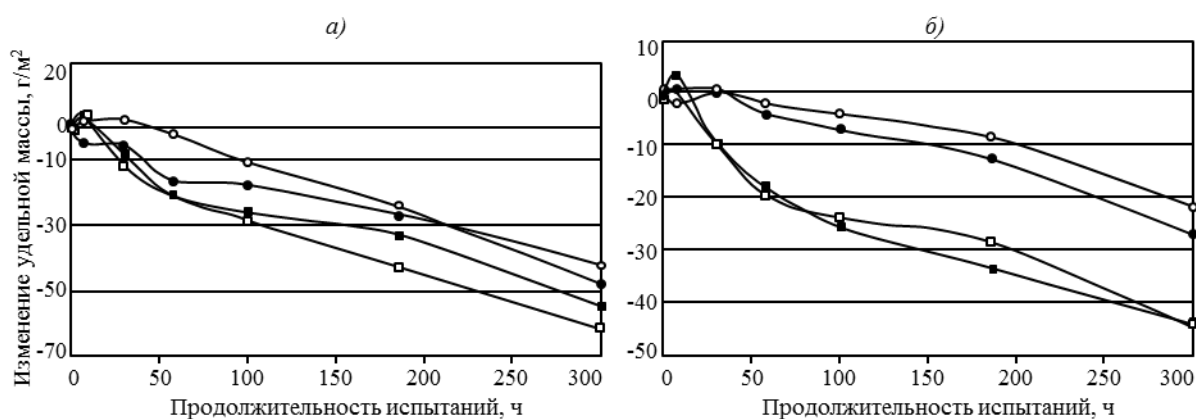


Рис. 1. Зависимости изменения удельной массы образцов из сплавов ВКНА-1В (а) и ВКНА-25 (б) при температуре испытаний 1250°С с покрытиями СДП-41+ВСДП-16 (●), ВСДП-3+ВСДП-16 (■), ВСДП-4+ВСДП-16 (○); □ – без покрытия

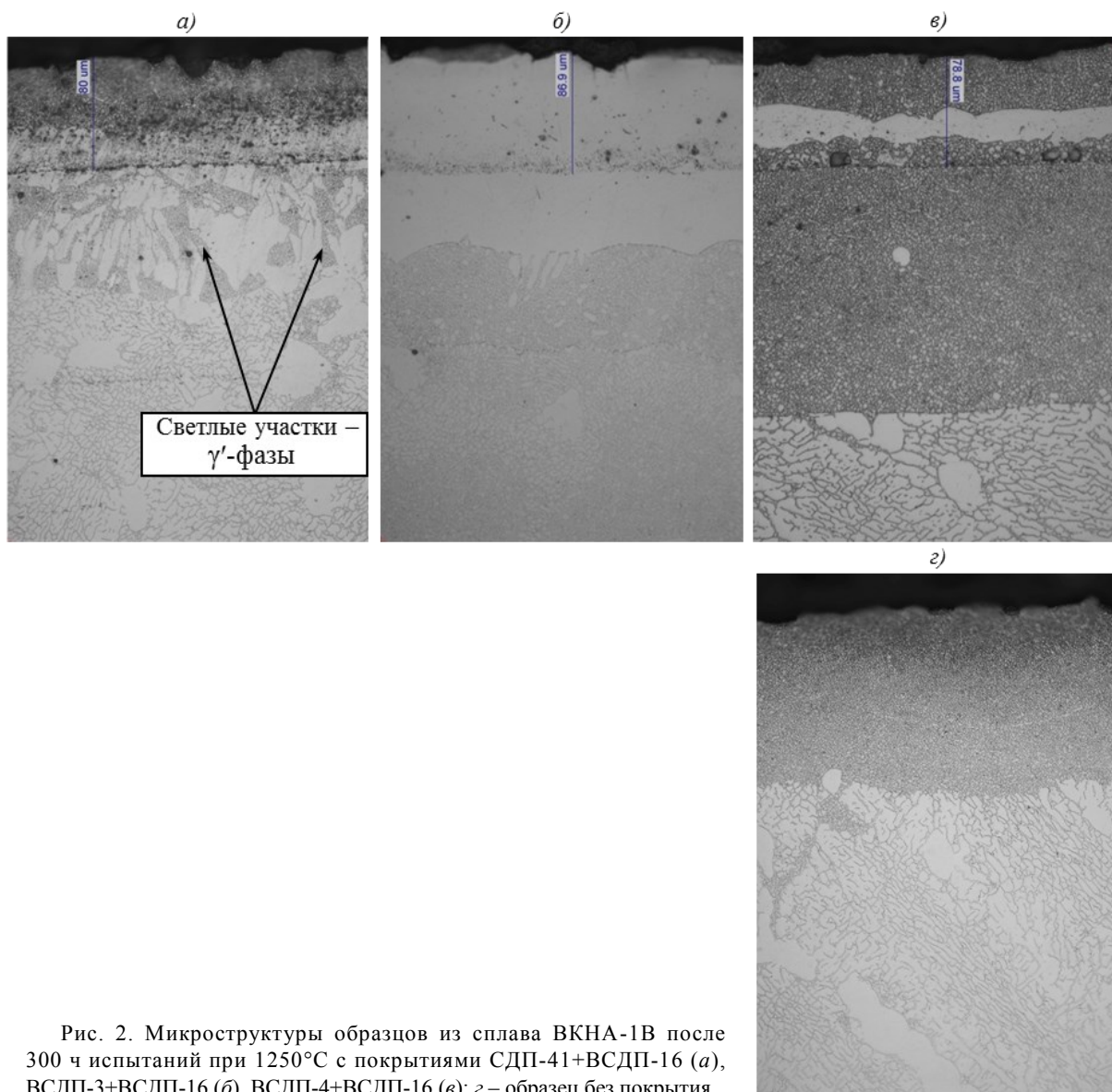


Рис. 2. Микроструктуры образцов из сплава ВКНА-1В после 300 ч испытаний при 1250°С с покрытиями СДП-41+ВСДП-16 (а), ВСДП-3+ВСДП-16 (б), ВСДП-4+ВСДП-16 (в); г – образец без покрытия

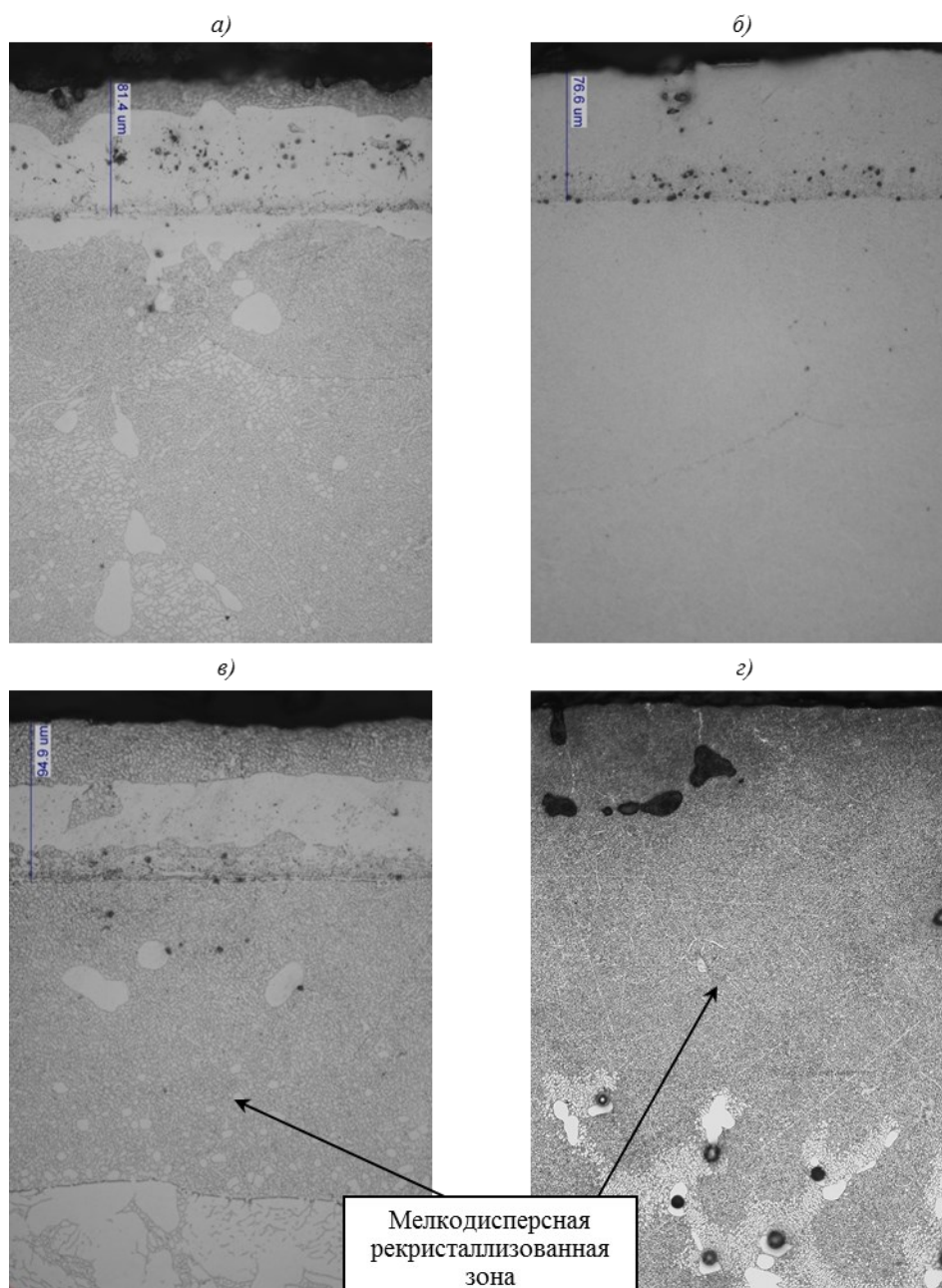


Рис. 3. Микроструктуры образцов из сплава ВКНА-25 после 300 ч испытаний при 1250°C с покрытиями СДП-41+ВСДП-16 (а), ВСДП-3+ВСДП-16 (б), ВСДП-4+ВСДП-16 (в); г – образец без покрытия

системы $(\text{Ni-Cr-Al-Ta-Re-Y-Hf})+(\text{Al-Ni-Y})$, содержащее карбидообразующие элементы, позволяющие формировать диффузионный барьер на границе «сплав-покрытие», и элементы, стабилизирующие структуру и фазовый состав покрытия [10].

Помимо сплава СДП-41 для испытаний при температурах 1250 и 1300°C были выбраны менее дорогостоящие сплавы ВСДП-3 и ВСДП-4, отличающиеся от СДП-41 отсутствием в их составе тантала и рения (табл. 1) [11–12].

В качестве внешнего алюминидного слоя наносился серый сплав ВСДП-16 системы Al-Ni-Y .

Покрытия наносились на дискообразные образцы диаметром 2,54 см на вакуумной ионно-плазменной установке с автоматизированной системой управления технологическим процессом типа МАП-2. После нанесения проводился высокотемпературный вакуумный отжиг для окончательного формирования покрытия.

Испытания на изотермическую жаростойкость при температуре 1250°C на базе 300 ч образцов из сплава ВКНА-1В (рис. 1, а) показали в целом одинаковые результаты для всех покрытий. Потеря массы для образцов составила от 42 до 55 г/м². В то время как на образцах из сплава ВКНА-25

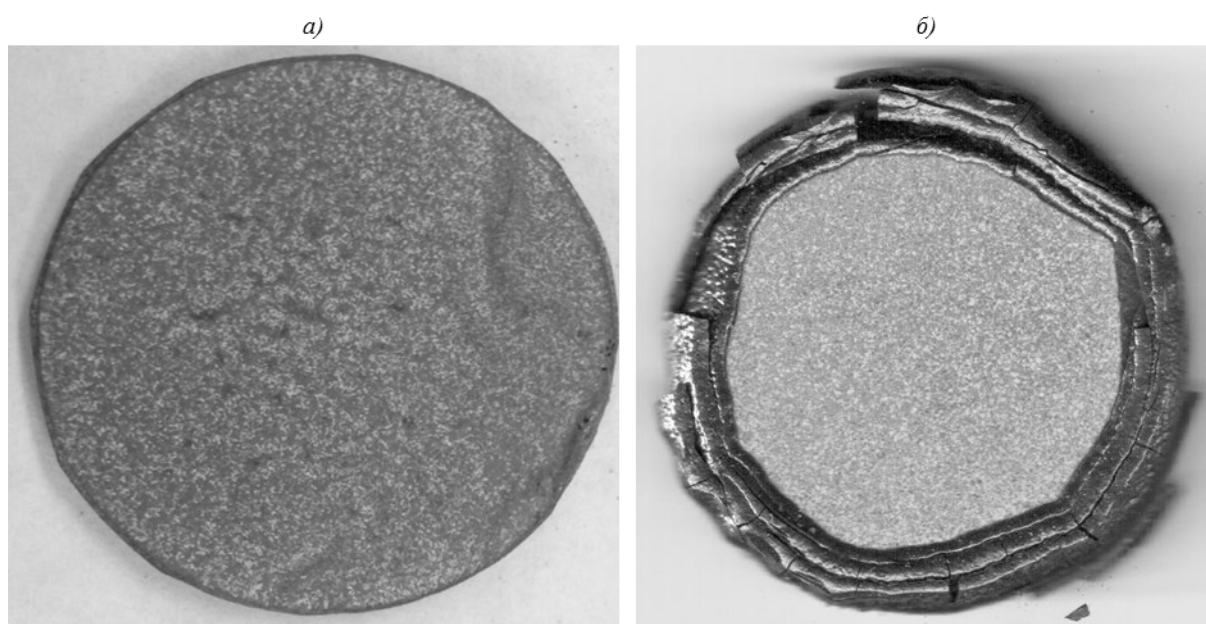


Рис. 4. Внешний вид образцов из сплава ВКНА-1В после 100 ч испытаний при 1300°С с покрытием ВСДП-3+ВСДП-16 (а) и без покрытия (б)

Таблица 2

Результаты испытаний на длительную прочность образцов из сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25

Сплав	Условия испытаний	Время до разрушения, ч					
		образцов без покрытия			образцов с покрытием		
ВКНА-1В	100 ч, 50 МПа	95,5	68	54,5	68	199	172
	500 ч, 30 МПа	555	560	463	575	777	470*
ВКНА-25	100 ч, 40 МПа	195	38	354	98,6	238	348
	500 ч, 30 МПа	693	302,5	350	550	752	300

* Испытания образца продолжаются.

(рис. 1, б) покрытия ВСДП-4+ВСДП-16 и СДП-41+ВСДП-16 продемонстрировали практически вдвое меньшие потери массы, чем покрытие ВСДП-3+ВСДП-16 и сплав без покрытия. В целом для обоих сплавов образцы с покрытиями обладают лучшей жаростойкостью, чем образцы без покрытий.

Исследование микроструктуры образцов после испытаний показали, что наличие покрытий существенно не влияет на изменения в структуре сплава в ходе высокотемпературных испытаний (рис. 2 и 3). В случае покрытий ВСДП-3+ВСДП-16 и ВСДП-4+ВСДП-16 под границей раздела сплава и покрытия можно наблюдать такие же мелкодисперсные рекристаллизованные зоны, как и на образце без покрытия. Картина отличается только на образце с покрытием СДП-41+ВСДП-16, где на поверхности шлифа на фоне мелкодисперсной смеси фаз γ и γ' наблюдаются крупные участки светлой фазы (по-видимому – γ' -фазы) (рис. 2, а и 3, а). Это должно быть связано с наличием в сплаве СДП-41 сравнительно большого количества

тантала, который тормозит диффузию между сплавом и покрытием, а также является элементом, упрочняющим γ' -фазу [13, 14]. Совокупность этих свойств замедляет процессы изменения в структуре сплава.

Проведены испытания на изотермическую жаростойкость при 1300°С на базе 100 ч. Лучшие результаты также показали покрытия ВСДП-4+ВСДП-16 и СДП-41+ВСДП-16 (потеря массы 40 и 55 г/м² соответственно – для сплава ВКНА-1В; 11 и 36 г/м² – для сплава ВКНА-25). В то же время поверхность образца из сплава ВКНА-1В с покрытием ВСДП-3+ВСДП-16 претерпела деформационные изменения – стала «волнообразной», образец потерял форму идеального круга (рис. 4, а). Такие деформации указывают на внутреннее оплавление. Это может быть связано с высоким содержанием в сплаве ВСДП-3 хрома (~20% по массе), который обладает низкой растворимостью в твердом растворе и может образовывать неблагоприятные фазы с пониженной температурой плавления. Стоит отметить также

оплавление образца из сплава ВКНА-1В без покрытия, прошедшее по внешнему радиусу образца (рис. 4, б).

Проведенные испытания на длительную прочность при температуре 1200°C на базах 100 и 500 ч образцов без покрытий и с покрытием ВСДП-4+ВСДП-16 показали, что покрытие не снижает механические характеристики сплавов (табл. 2).

Заключение

Таким образом, проведены исследования

свойств жаростойких покрытий для интерметаллидных никелевых сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 при рабочих температурах 1250–1300°C. Показано, что лучшей жаростойкостью обладают покрытия ВСДП-4+ВСДП-16 системы (Ni–Cr–Al–Hf)+(Al–Ni–Y) и СДП-41+ВСДП-16 системы (Ni–Cr–Al–Ta–Re–Y–Hf)+(Al–Ni–Y), отличающиеся пониженным содержанием хрома. Проведенные испытания показали, что покрытие ВСДП-4+ВСДП-16 не снижает характеристики длительной прочности сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 38–52.
2. 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).
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
4. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
5. 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.
6. Гаямов А.М. Жаростойкое покрытие с композиционным барьерным слоем для защиты внешней поверхности рабочих лопаток ГТД из ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов /В сб. трудов XI Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». М.: ИМЕТ РАН. 2012. С. 473–475.
7. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; опубл. 27.09.2009.
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
9. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 3–8.
10. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Космин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 12–15.
11. 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.
12. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17–20.
13. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. №SP2. С. 26–37.
14. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36-ВИ //МиТОМ. 2011. №1. С. 34–40.