

УДК 620.1:669.018.44

О.А. Быценко¹, Е.В. Филонова¹, А.Б. Марков², Н.А. Белова¹

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЛОИ СОВРЕМЕННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-10-10

С использованием комплекса металлофизических методов проведены исследования физико-химического и структурно-фазового состояний поверхностного слоя до и после модифицирования с помощью облучения образцов с нанесенными на них жаростойкими конденсированными ионно-плазменными покрытиями трех различных композиций сильноточными электронными пучками по пяти выбранным режимам при варьировании значениями энергии электронов и числом импульсов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: облучение сильноточными электронными пучками, конденсированные ионно-плазменные покрытия, структурно-фазовое состояние, исследование микроструктуры.

With use of complex of metallophysical methods the research of physical-chemical, structural and phase conditions of the surface layer before and after modifying is carried out by means of radiation by high-current electron beams of samples with heat-resisting condensed ion-plasma coatings of three different compositions on 5 chosen modes at variation of values of electron energy and pulse number.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 2.1. «Fundamental-oriented researches» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: radiation by the high-current electron beams, condensed ion-plasma coatings, structural and phase conditions, microstructure research.

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

²Институт сильноточной электроники СО РАН [Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences] E-mail: contact@hcei.tsc.ru

Введение

Разработка новых жаропрочных материалов, отвечающих современным требованиям конструкторов авиационных двигателей к наиболее нагруженным деталям, прежде всего к лопаткам и дискам проточной части турбины, является важнейшей задачей авиационного материаловедения [2, 3].

Для успешного решения этой задачи во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ) создан задел в области разработки материалов для ГТД пятого и шестого поколения. В ВИАМ разработаны никелевые сплавы, содержащие до 9% (по массе) рения, и новые ионно-плазменные покрытия. Однако существует необходимость в повышении жаростойкости и эрозионной стойкости разработанных покрытий. В свя-

зи с этим другой актуальной задачей авиационного двигателестроения является развитие наиболее прогрессивных методов инженерии поверхности деталей, изготовленных из жаропрочных сплавов, особенно из жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС [1, 4–7]. Разработка и совершенствование методов поверхностной инженерии с использованием концентрированных импульсных потоков энергии (КИПЭ) имеет ряд преимуществ перед классическими методами поверхностной механической, химической и термомеханической обработок: формирование уникального физико-химического состояния материала поверхностного слоя; достижение рекордных точности изготовления и шероховатости поверхности [8–11].

Цель данной работы – проведение комплексных исследований физико-химического и структурно-фазового состояний материала [12] и изучение влияния режимов облучения высокоэнергетическими электронными пучками (СИЭП) наносимых покрытий Ni–Cr–Al–Y различных композиций на поверхность облученных мишеней из жаропрочного никелевого сплава ЖС36-ВИ для получения объективных и достоверных результатов.

Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы из жаропрочного никелевого сплава ЖС36 с нанесенными ионно-плазменными конденсированными покрытиями трех различных композиций: ВСДП-4+ВСДП-16; СДП-2+ВСДП-16; ВСДП-3+ВСДП-16. После нанесения покрытия образцы подвергали стандартной термической обработке: диффузионному отжигу при температуре 1050°C в течение 2 ч в вакууме.

Облучение проводили на комплексной автоматизированной электронно-пучковой установке «РИТМ-СП» по двум выбранным режимам: энергия электронов (E) составила 32 кэВ, число импульсов: 10 (режим 1) и 30 (режим 2). Наибольший практический интерес представляет вторая композиция покрытия, так как она более известна и апробирована для ответственных деталей ГТД (рабочая лопатка ТВД). В связи с этим для образцов с покрытием СДП-2+ВСДП-16 дополнительно выбраны еще три режима: $E=30$ кэВ, 10 импульсов (режим 3); $E=25$ кэВ, 10 импульсов (режим 4); $E=20$ кэВ, 10 импульсов (режим 5).

Состояние поверхности образцов до и после облучения исследовали при помощи конфокального сканирующего лазерного микроскопа Lext OLS310. Оценку остаточных напряжений проводили на анализаторе PSF-3M Rigaku в Cr K_{α} -излучении, методом изо-наклона (рабочий режим анализатора: напряжение 30 кВ, ток 8 мА). Расчет значений остаточных напряжений выполнен по методу « $\sin^2\psi$ ». Напряжения определяли в автоматическом режиме по семи значениям угла ψ в интервале от 0 до 40 град. Для определения напряжений в интервале углов (2θ) от 148 до 158 град выбрана рентгеновская линия β -фазы (AlNi) 211. Для определения положения линий выбран метод FWHM (ширина рентгеновских линий на полувысоте), имеющий наименьшую погрешность. Для расчетов использованы следующие величины: модуль упругости при комнатной температуре 180000 МПа; коэффициент Пуассона 0,3.

Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере Durascan-70 в пяти точках, включая основной материал, по методу Кнуппа, в качестве индикатора применяли четырехгранную алмазную пирамиду с ромбовидным основанием.

Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе Leica Dm IRM, элементный состав поверхностных слоев покрытия до и после облучения – на сканирующем растровом электронном микроскопе VERIOS 460 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором X-MAX 80

Результаты

При исследовании микроструктуры выбранных покрытий до и после облучения сильноточными электронными пучками микросекундной длительности по режимам 1 и 2 с помощью конфокального лазерного микроскопа выявлено значительное снижение шероховатости поверхности образцов, причем для образцов с покрытием ВСДП-4+ВСДП-16 шероховатость поверхности снизилась в 2 раза, с покрытием СДП-2+ВСДП-16 – в 2,2 раза, с покрытием ВСДП-3+ВСДП-16 – в 1,7 раза. На основании полученных результатов можно сделать предварительный вывод, что изменение шероховатости поверхности образцов может быть также связано с элементным составом и структурно-фазовым состоянием покрытий до облучения (см. таблицу).

Значения шероховатости поверхности исследуемых образцов

Условный номер образца	Среднее арифметическое отклонение профиля (R_a), мкм		Максимальная высота неровности профиля по десяти точкам (R_z), мкм	
	до облучения	после облучения	до облучения	после облучения
1	2,76	1,31	27,5	17,7
2	2,11	1,17	23,33	15,91
3	2,94	1,88	27,61	17,89
4	2,81	1,25	24,58	16,68
5	2,60	1,66	22,33	15,78
6	2,44	1,26	23,09	17,4

По результатам анализа полученных данных установлено, что после модифицирования поверхности выявлено значительное количество трещин на поверхности образцов, что связано с наличием растягивающих напряжений после обработки сильноточными электронными пучками по режимам 1–3.

Результаты определения остаточных напряжений в образцах с покрытиями в исходном состоянии показали наличие сжимающих остаточных напряжений, величина которых находится в интервале от 25 до 50 МПа. После облучения в поверхностном слое образцов с покрытиями обнаружены растягивающие остаточные напряжения в диапазоне от 175 до 300 МПа, причем максимальные значения наблюдаются при облучении образцов с покрытиями ВСДП-4+ВСДП-16 и СДП-2+ВСДП-16 при облучении СИЭП по режиму 1.

Наличие в поверхностном слое облученных образцов растягивающих остаточных напряжений может привести к снижению эксплуатационных свойств мишеней, особенно усталостной прочности и сопротивления пылевой эрозии. В связи с этим необходимо провести финишную термообработку в вакууме при температурах, близких к рабочим температурам лопаток ГТД (1000–1100°C). Такая термообработка, кроме снятия остаточных напряжений, должна стабилизировать структуру материала в поверхностном слое [13–15].

Анализ полученных данных показал, что микротвердость основного материала и слоев покрытий, контактирующих с подложкой, осталась неизменной.

При сравнительном анализе значений микротвердости поверхностных слоев в исходном состоянии и после модификации поверхности показано снижение микротвердости поверхностных слоев покрытия на границах модифицированного слоя после облучения сильноточными электронными пучками, что связано с формированием рас-

тягивающих остаточных напряжений. Однако следует заметить, что данное снижение составляет не более 15% в зависимости от композиции покрытия (рис. 1).

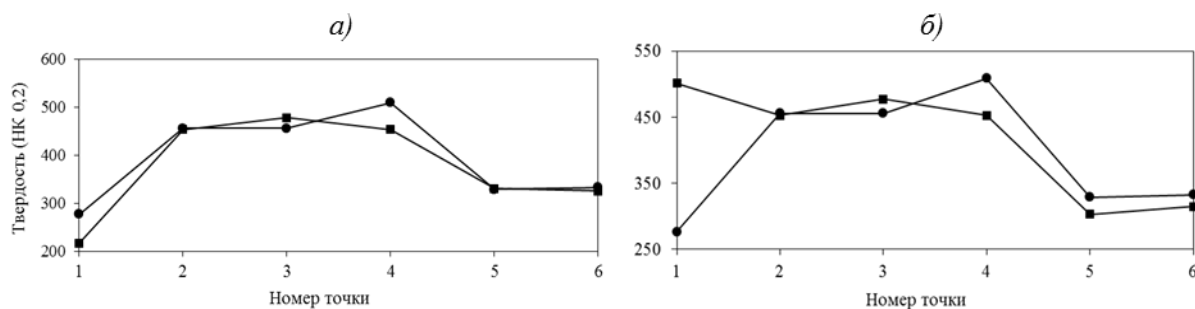


Рис. 1. Микротвердость образцов 38 (а) (покрытие СДП-2+ВСДП-16) и 47 (б) (покрытие ВСДП-3+ВСДП-16)

Незначительное снижение или увеличение значений микротвердости внутренних слоев покрытий связано с неоднородностью фазового и химического состава на границах каждого подслоя.

Методами растровой электронной и оптической микроскопии проведено сравнительное исследование микроструктуры образцов до и после обработки сильноточными электронными пучками. При исследовании конденсированных многокомпонентных ионно-плазменных покрытий до и после облучения установлено, что покрытия – многослойные, имеют различное строение в зависимости от его состава. После обработки поверхности образцов сильноточными электронными пучками наблюдается изменение структуры поверхностных слоев покрытий по сравнению с исходной структурой покрытий. Измененный (модифицированный) слой покрытия представляет собой слабо травящийся поверхностный слой глубиной до 3–5 мкм.

Необходимо отметить, что структура внутренних слоев покрытия, а также слоев, контактирующих с подложкой, практически не изменяется в результате электронно-лучевой обработки в отличие от свободной поверхности покрытия. Это достаточно очевидно, так как средняя толщина покрытия в зависимости от композиции составила 70–85 мкм, что значительно превышает зону термализации электронов при облучении.

Проведены исследования микроструктуры покрытий, по результатам которых установлено, что в исходном состоянии они имеют структуру, состоящую из фаз β -NiAl и γ' -Ni₃Al.

Для образца с покрытием ВСДП-4+ВСДП-16 внешний слой представляет собой зерна β -фазы, а внутренний слой состоит из зерен β -фазы, по границам которой наблюдаются частицы γ' -фазы. Внешний край покрытия имеет пористую структуру.

Для образцов с покрытиями СДП-2+ВСДП-16 и ВСДП-3+ВСДП-16 внешний слой представляет собой зерна β -фазы, по границам которых расположены частицы γ' -фазы. Внутренний слой состоит их зерен β - и γ' -фаз. Внешний край покрытий имеет слоистую структуру и несплошности между слоями.

После облучения сильноточными электронными пучками микроструктура поверхностного слоя глубиной до 5 мкм представлена в основном β -фазой, слой – однородный, не имеет дефектов в виде пор, слоистости и несплошности не обнаружено (рис. 2).

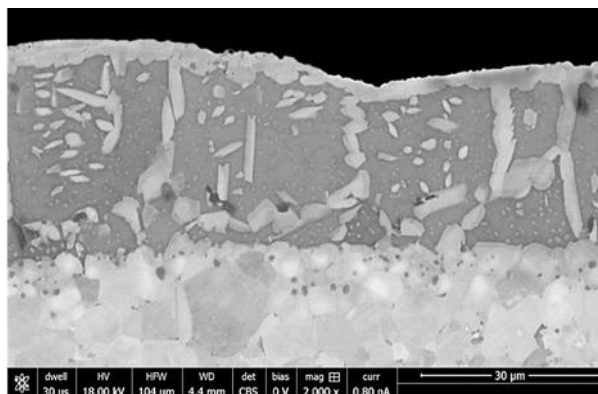


Рис. 2. Микроструктура модифицированного слоя и подслоев покрытия СДП-2+ВСДП-16 после облучения по режиму $E=25$ кэВ, $N=10$ импульсов

Исследование микроструктуры образцов методом растровой электронной микроскопии, облученных по режиму 4 и 5, подтвердило предположение, что наличие микротрещин связано с технологическими дефектами, образовавшимися при нанесении покрытий.

Исследование элементного состава, как поверхностных слоев покрытия, так и подслоев до и после облучения, проводилось с помощью микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Особый интерес представляло исследование поверхностных слоев покрытия на глубину до 5 мкм (на границах модифицированного слоя), так как элементный состав подслоев практически одинаков до и после облучения.

Элементный состав в поверхностном слое до облучения неоднороден и имеет следующий состав (на глубине до 5 мкм):

– в покрытии ВСДП-4+ВСДП-16 наблюдаются участки состава, % (по массе): 18 Al–49,9 Cr–32 Ni, а также состава 31,9 Al–18,7 Cr–66,4 Ni;

– в поверхностном слое имеются участки с элементным составом, % (по массе): 33,9 Al–2,9 Cr–63 Ni и 31 Al–14,6 Cr–49,8 Ni, а также 17 Al–32,2 Cr–38,8 Ni;

– для покрытия ВСДП-3+ВСДП-16 в поверхностном слое также наблюдаются участки различного состава, % (по массе): 32,6 Al–5,8 Cr–60,5 Ni и 33,9 Al–0,82 Cr–65,3 Ni.

Видно, что облучение с помощью высокоэнергетических электронных пучков позволило получить однородный состав поверхностного слоя.

При исследовании элементного состава модифицированного слоя (после облучения СИЭП) всех композиций покрытия с помощью микрорентгеноспектрального анализа установлено, что химический состав слоя однороден и имеет следующий состав:

– для композиции ВСДП-4+ВСДП-16, % (по массе): 24,2 Al–16,4 Cr–59,3 Ni;

– для композиции СДП-2+ВСДП-16, % (по массе): 29,6 Al–17,3 Cr–55,6 Ni;

– для композиции ВСДП-3+ВСДП-16, % (по массе): 23,06 Al–11,7 Cr–53,1 Ni.

Для наиболее полного анализа структуры и элементного состава покрытия проведены исследования микроструктуры и локального химического состава покрытий в исходном состоянии и после облучения. Карты распределения химических элементов в покрытии до и после облучения приведены на рис. 3.

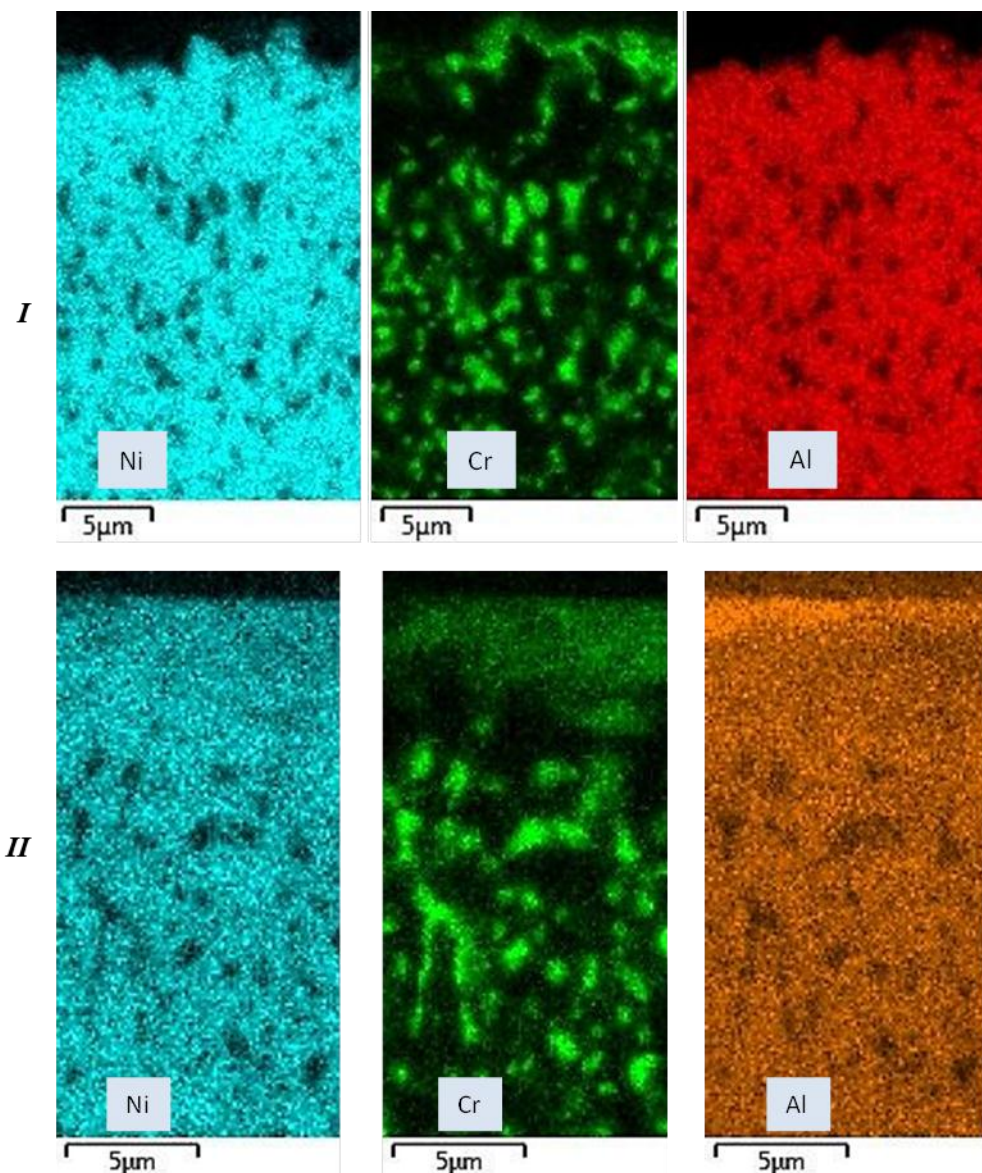


Рис. 3. Распределение никеля, хрома и алюминия в покрытии в исходном состоянии (*I*) и после облучения (*II*)

Анализ карт распределения химических элементов показывает, что никель и алюминий распределены в покрытии равномерно. Хром в покрытии в исходном состоянии распределен неравномерно – присутствует в частицах, матрица обеднена хромом. После облучения приповерхностный слой (облученный слой) имеет равномерное распределение всех элементов.

Обсуждение и заключения

В процессе проведения работ реализован комплексный подход к анализу физико-химического и структурно-фазового состояний материала образцов до и после облучения высокоэнергетическими импульсными электронными пучками. Разработана оригинальная методика проведения исследований, позволяющая одновременно сравнивать состояние модифицированных поверхностных слоев, приповерхностных слоев и состояние современных жаростойких покрытий различных композиций до облучения.

При исследовании микроструктуры выбранных покрытий до и после облучения сильноточными электронными пучками микросекундной длительности по режимам 1 и 2 выявлено значительно снижение шероховатости поверхности образцов, причем для образцов с покрытием ВСДП-4+ВСДП-16 шероховатость снизилась в 2 раза, для образцов с покрытием СДП-2+ВСДП-16 – в 2,2 раза, а для образцов с покрытием ВСДП-3+ВСДП-16 – в 1,7 раза.

При сравнительном анализе значений микротвердости поверхностных слоев покрытия до и после их модификации показано снижение микротвердости поверхностного слоя покрытия на границах модифицированного слоя после облучения сильноточными электронными пучками.

Облучение образцов с покрытиями с помощью сильноточных электронных пучков позволило получить однородный состав поверхностного слоя на глубину 3–5 мкм. Анализируя все вышеуказанные данные исследований можно сделать предварительный вывод, что предпочтение можно отдать режиму облучения 4: $E=25$ кэВ, $N=10$, следует провести облучение по данному режиму образцов с двумя другими композициями покрытий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-97046 - р_поволжье_a).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. № 10. С. 23–32.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 60–70.
5. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.
6. Будиновский С.А., Смирнов А.А., Матвеев П.В., Чубаров Д.А. Разработка теплозащитных покрытий для рабочих и сопловых лопаток турбины из жаропрочных и интерметаллидных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5.
7. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 632 с.
8. Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н., Теряев Д.А., Быценко О.А. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинного двигателя с перфорационными отверстиями // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 10 (106). С. 23–25.
9. Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А. и др. Использование сильноточных импульсных электронных пучков для модификации свойств лопаток ГТД // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2003. №3. С. 41–49.
10. Новиков А.С., Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А. Перспективные технологии поверхностной обработки при изготовлении и ремонте лопаток ГТД // Двигатель. 2004. №2 (32). С. 18–19.

11. Пайкин А.Г., Шулов В.А., Петухов А.Н., Львов А.Ф. Перспективы применения сильноточечных импульсных электронных пучков для модификации поверхности при изготовлении и ремонте лопаток ГТД // Вопросы авиационной науки и техники: сб. тр. ЦИАМ. Сер.: Авиационное двигателестроение. 2006. №4 (1327). С. 5–32.
12. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2015).
13. Пайкин А.Г., Крайников А.В., Шулов В.А., Быценко О.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Чикиряка А.В. Технологические основы модифицирования поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойким NiCrAlY покрытием с применением сильноточечных импульсных электронных пучков // Физика и химия обработки материалов. 2008. №3. С. 56–60.
14. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Разработка электронно-лучевого технологического процесса восстановления свойств лопаток турбины ГТД из сплава ЖС26НК с жаростойким покрытием NiCrAlY // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №3. С. 34–38.
15. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Теряев Д.А., Быценко О.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Структурно-фазовые изменения в поверхностных слоях деталей из титанового сплава ВТ6 при облучении сильноточечным импульсным электронным пучком // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 3. С. 5–9.