ВИАМ/2015-Тр-01-01

УДК 629.7.023.224:669.017.165
DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-1-1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ СДП-42+ВСДП-18 НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ И ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВИН3 ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1200°С

А.А. Косьмин

С.А. Будиновский
доктор технических наук

Январь 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.

УДК 629.7.023.224:669.017.165
DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-1-1

А.А. Косьмин[1], *С.А. Будиновский*[1]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ СДП-42+ВСДП-18 НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ И ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВИН3 ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1200°С

Представлены результаты исследований циклической и изотермической жаростойкости, а также длительной прочности нового интерметаллидного сплава ВИН3 с конденсационно-диффузионным ионно-плазменным покрытием СДП-42+ВСДП-18 при температуре 1200°С на базе испытаний до 500 ч. Показано, что конденсационно-диффузионное покрытие СДП-42 (Ni–Cr–Al–Ta–W–Y–Hf)+ВСДП-18 (Al–Ni–Cr–Y) обеспечивает защиту сплава ВИН3 в условиях циклического окисления при температурах 1200⇄200°С на базе 100 циклов и изотермического окисления при 1200°С на базе 500 ч. Покрытие системы СДП-42+ВСДП-18 не снижает паспортных характеристик длительной прочности сплава ВИН3 при температуре испытаний 1200°С на базах 10, 100 и 500 ч.

Ключевые слова: *ионно-плазменные покрытия, ионно-плазменная технология, интерметаллидные сплавы, лопатки турбин.*

A.A. Kosmin, S.A. Budinovsky

INFLUENCE OF SDP-42+VSDP-18 ION-PLASMA COATING ON HEAT-RESISTANCE AND LONG-TERM STRENGTH OF VIN3 INTERMETALLIC ALLOY AT 1200°C

Results of research of cyclic and isothermal heat resistance and long-term strength of new VIN3 intermetallic alloy with overlay ion-plasma SDP-42+VSDP-18 coating at 1200°C are shown on a base of tests up to 500hrs. It is shown that overlay ion-plasma coating SDP-42 (Ni–Cr–Al–Ta–W–Y–Hf)+VSDP-18 (Al–Ni–Cr–Y) ensures a protection of VIN3 alloy within cyclic oxidation at 1200⇄200°C (100 cycles) and isothermal oxidation at 1200°C (500 hours). The coating of SDP-42+VSDP-18 system does not reduce passport characteristics of long-term strength of VIN3 alloy at 1200°C (10, 100 and 500 hours).

Keywords: *ion-plasma coatings, ion-plasma technology, intermetallic alloys, turbine blades.*

[1]Федеральное 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

В настоящее время повышение тактико-технических характеристик авиационных газотурбинных двигателей невозможно без применения новых материалов, обладающих более высокими температурными и прочностными характеристиками по сравнению с серийными жаропрочными сплавами [1, 2].

Для комплексного повышения служебных характеристик существующих конструкций ГТД, в том числе продления ресурса работы, снижения массы и повышения рабочих температур, перспективным является применение интерметаллидных сплавов на никелевой основе [3–5]. В ВИАМ разработан ряд интерметаллидных литейных никелевых сплавов серии ВИН, обладающих пониженной плотностью и удовлетворительным комплексом механических свойств при температурах до 1200°С на базах испытаний до 1000 ч [6–9]. Однако обеспечение длительных ресурсов работы деталей турбин из интерметаллидных сплавов в условиях интенсивных теплосмен не представляется возможным без применения защитных покрытий [10–14].

В ВИАМ выполнен ряд исследований, направленных на создание эффективного жаростойкого покрытия для перспективного интерметаллидного жаропрочного никелевого сплава ВИН3. По предварительным результатам испытаний на жаростойкость предложено новое покрытие СДП-42 (Ni–Cr–Al–Ta–W–Y–Hf)+ВСДП-18 (Al–Ni–Cr–Y), которое обеспечило защиту сплава при температурах до 1200°С. По характеристикам жаростойкости покрытие превосходит серийно используемые в промышленности покрытия типа СДП-2+ВСДП-16, а также обладает меньшей стоимостью по сравнению с ранее разработанными покрытиями, содержащими рений [15].

В связи с этим проведены работы по оценке влияния покрытия СДП-42+ВСДП-18 на характеристики длительной прочности сплава ВИН3 и по определению жаростойких характеристик композиции «сплав–покрытие» при температуре 1200°С.

Материалы и методы

Покрытия наносили на монокристаллические образцы из сплава ВИН3 с кристаллографической ориентацией <001> на вакуумной ионно-плазменной установке МАП-2 с автоматизированной системой управления технологическим процессом [16].

Испытания на изотермическую жаростойкость проводили в соответствии с ГОСТ 6130 на дисковых образцах ⌀25 мм и высотой 3 мм в атмосферной печи в керамических тиглях с крышками при температуре 1200°С.

Исследования на циклическую жаростойкость проводили на дисковых образцах ⌀25 мм и высотой 3 мм. Один цикл продолжительностью 1 ч включал в себя выдержку при температуре 1200°С в течение 50 мин и охлаждение на воздухе в течение 10 мин до температуры 200°С.

Оценка изотермической и циклической жаростойкости сплава с покрытием и без него осуществлялась гравиметрическим методом – путем взвешивания образцов каждые 20–80 ч испытаний и определения удельного изменения массы образцов без учета массы окалины, осыпавшейся с их поверхности.

Характеристики длительной прочности определяли при температуре 1200°С на базах испытаний до 500 ч на установке ZST2/3-ВИЭТ в соответствии с ГОСТ 10145–81.

Микроструктуру композиций «сплав–покрытие» исследовали на оптическом микроскопе Olympus GX51.

Результаты

Результаты исследования циклической жаростойкости образцов из сплава ВИН3 с защитными покрытиями СДП-42+ВСДП-18 и СДП-2+ВСДП-16 (общей толщиной 80 мкм) при температурах 1200⇄200°С на базе испытаний 100 циклов представлены на рис. 1. Видно, что имеет место рост массы образцов с покрытием СДП-42+ВСДП-18 – до 10 г/м^2. Разрушения основного материала образца не происходит. Масса оксидов, сформировавшихся в поверхностном слое покрытия, превышает массу осыпавшейся окалины, что указывает на высокие защитные свойства покрытия. Образцы без покрытия и с покрытием СДП-2+ВСДП-16 демонстрируют ускоренное разрушение поверхности в условиях испытаний.

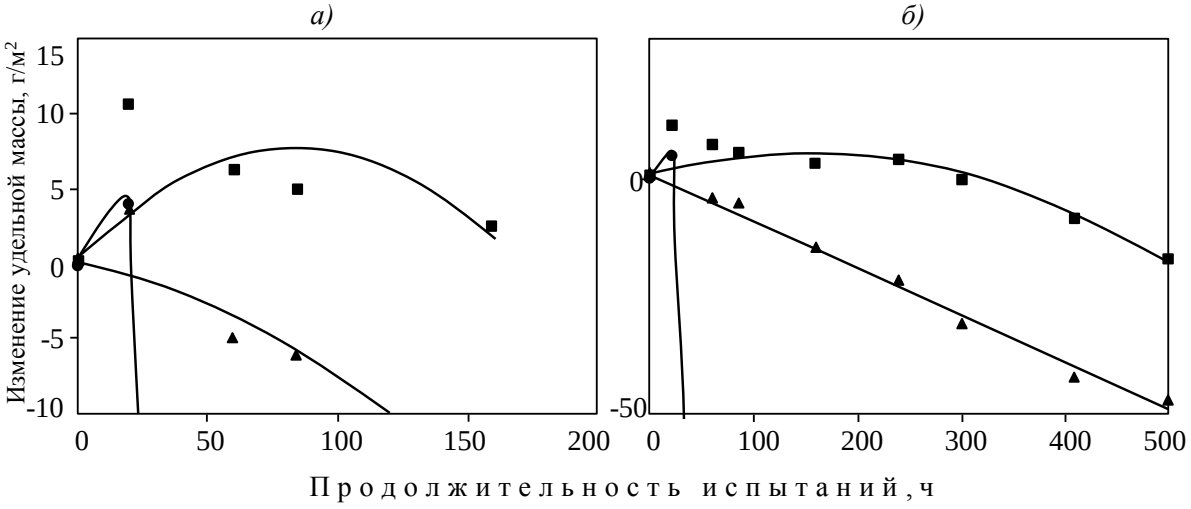


Рисунок 1. Зависимость удельного изменения массы образцов из сплава ВИН3 с покрытиями СДП-2 (80 мкм)+ВСДП-18 (60 г/мм^2) (▲), СДП-42 (80 мкм)+ВСДП-18 (60 г/мм^2) (■) и без покрытия (●) от продолжительности испытаний на циклическую жаростойкость при температурах 1200⇄200°С (*а*) и на изотермическую жаростойкость при температуре 1200°С (*б*)

Результаты исследования изотермической жаростойкости образцов из сплава ВИН3 с защитными покрытиями при температуре 1200°С на базе испытаний 500 ч приведены на рис. 2. Видно, что после 400–500 ч испытаний образцы с покрытием СДП-42+ВСДП-18 имеют незначительную потерю массы (на уровне 10–15 г/м^2) и превосходят по жаростойкости серийное покрытие СДП-2+ВСДП-16.

а) *б)*

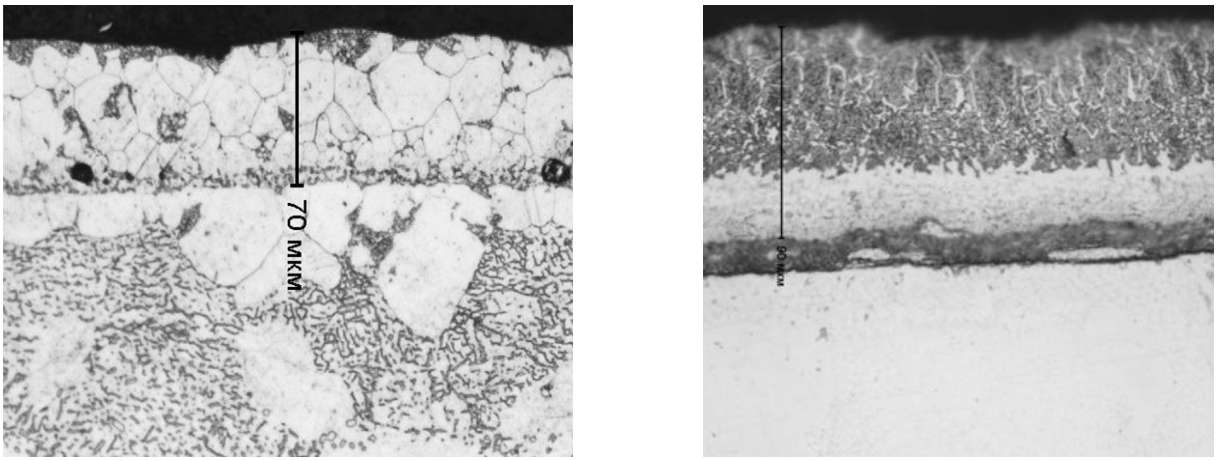


Рисунок 2. Микроструктура (×300) образцов из сплава ВИН3 с покрытием СДП-42 (80 мкм)+ВСДП-18 (60 г/мм^2) после испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1200°С на базе 500 ч (*а*) и циклическую жаростойкость при температурах 1200⇄200°С на базе 100 циклов (*б*)

По результатам испытаний на жаростойкость видно, что сплав ВИН3 при температуре 1200°С катастрофически быстро окисляется и без защитного покрытия применяться при данной температуре не может.

Проведены металлографические исследования образцов из сплава ВИН3 с защитным покрытием после испытаний на изотермическую и циклическую жаростойкость. На поле шлифа образца после циклических испытаний (см. рис. 2, *б*) наблюдаются значительные участки «темной» фазы, представляющие собой, по-видимому, жаростойкую β-фазу, вследствие чего можно сделать вывод, что деградации покрытия не происходит. На образце после испытаний на изотермическую жаростойкость (см. рис. 2, *а*) жаростойкой β-фазы значительно меньше, что связанно с большей длительностью испытаний и, как следствие, со снижением содержания алюминия в покрытии вследствие расходования его на поддержание защитной оксидной пленки на поверхности образца, а также диффузии в сплав-покрытие защищаемого материала (ВИН3). Основной фазой в покрытии после испытаний является γ′-фаза, также обладающая высокой жаростойкостью, среднее содержание алюминия в слое покрытия со-

ставляет 9–10% (по массе), что свидетельствует о том, что покрытие сохранилось и продолжает выполнять свои защитные функции на заданной базе испытаний.

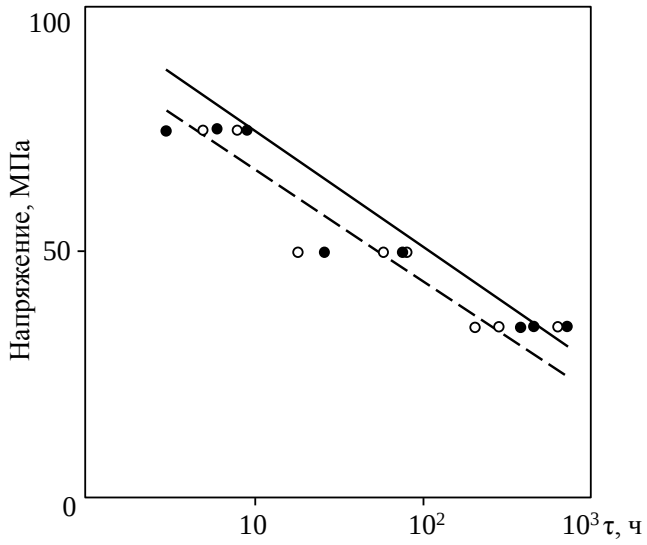


Рисунок 3. Результаты испытаний образцов из сплава ВИН3 с покрытием СДП-42 (80 мкм)+ВСДП-18 (60 г/мм^2) (●) толщиной 89 мкм и без покрытия (○) на длительную прочность при 1200°С

Исследования длительной прочности образцов из сплава ВИН3 с защитным покрытием СДП-42+ВСДП-18 проводили при температуре 1200°С на базах испытаний 10, 100 и 500 ч. Долговечность образцов из сплава ВИН3 с покрытием при испытаниях на длительную прочность в сравнении с паспортными характеристиками сплава представлена на рис. 3.

Обсуждение и заключения

Сплав ВИН3 при температуре 1200°С не обладает необходимой жаростойкостью и без защитного покрытия применяться не может.

Конденсационно-диффузионное покрытие СДП-42 (Ni–Cr–Al–Ta–W–Y–Hf)+ +ВСДП-18(Al–Ni–Cr–Y) обеспечивает защиту сплава ВИН3 в условиях циклического окисления при температурах 1200⇄200°С на базе 100 циклов и изотермического – при 1200°С на базе 500 ч.

Покрытие системы СДП-42+ВСДП-18 не снижает паспортных характеристик длительной прочности сплава ВИН3 при температуре испытаний 1200°С на базах 10, 100 и 500 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение. 2008. Т. 2. С. 159–192.
2. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е. и др. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 97–105.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
4. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 57–60.
5. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Каблов Д.Е. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 20–25.
6. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al: пат. 2434067 Рос. Федерация; опубл. 01.07.2010.
7. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al: пат. 2434068 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.
8. Жаропрочный сплав на никелевой основе для монокристаллического литья: пат. 2439184 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.
9. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
10. 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.
11. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 149–163.
12. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES //Russian metallurgy (Metally). 2012. V. 2012. №1. P. 1–7.

13. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //МиТОМ. 1995. №2. С. 15–18.
14. 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.
15. 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.
16. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. и др. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.

REFERENCES LIST

1. Inozemcev A.A., Nihamkin M.A., Sandrackij V.L. Osnovy konstruirovanija aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskih ustanovok [Basics of designing aircraft engines and power plants]. M.: Mashinostroenie. 2008. T. 2. S. 159–192.
2. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E. i dr. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovyh zagotovok iz litejnyh zharoprochnyh splavov novogo pokolenija [Modern technology of bar stock from the casting of superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 97–105.
3. 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.
4. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat-resistant casting intermetallic alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 57–60.
5. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A., Kablov D.E. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnyh i intermetallidnyh splavov s monokristallicheskoj strukturoj [The development process of directional solidification of high-temperature gas turbine engine blades and intermetallic alloys with a single-crystal structure] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 20–25.
6. Splav na osnove intermetallida Ni3Al [Based alloy Ni3Al intermetallic]: pat. 2434067 Ros. Federacija; opubl. 01.07.2010.

7. Splav na osnove intermetallida Ni3Al [Based alloy Ni3Al intermetallic]: pat. 2434068 Ros. Federacija; opubl. 05.10.2010.
8. Zharoprochnyj splav na nikelevoj osnove dlja monokristallicheskogo lit'ja [Superalloy for single crystal nickel-based casting]: pat. 2439184 Ros. Federacija; opubl. 05.10.2010.
9. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokoteplonagruzhennyh detalej gazoturbinnyh dvigatelej [Materials for high-thermal components of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
10. Kablov E.N., Mubojadzhjan 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. C. 60–70.
11. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Ionnoe travlenie i modificirovanie poverhnosti otvetstvennyh detalej mashin v vakuumno-dugovoj plazme [Ion etching and surface modification of critical parts in machines vacuum arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 149–163.
12. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTES //Russian metallurgy (Metally). 2012. V. 2012. №1. P. 1–7.
13. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //МиТОМ. 1995. №2. С. 15–18.
14. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Pomelov Ja.A. Ionno-plazmennye za-shhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinnyh dvigatelej [Ion-plasma protective coatings for gas turbine engine blades] //Konversija v mashinostroenii. 1999. №2. S. 42–47.
15. Matveev P.V., Budinovskij S.A., Mubojadzhjan 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. С. 12–15.
16. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. i dr. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennyh detalej kompressora GTD [Protective and strengthening ion-plasma coatings for blades and other critical parts of the compressor GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 71–81.