



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7

**ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ УПРОЧНЯЮЩИХ ИОННО-
ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПОМОЩИ АССИСТИ-
РОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ**

Д.А. Александров

С.А. Мубояджян

доктор технических наук

Д.С. Горлов

Июль 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

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7

Д.А. Александров¹, С.А. Мубояджян¹, Д.С. Горлов¹

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ УПРОЧНЯЮЩИХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПОМОЩИ АССИСТИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ

Представлены результаты исследований по влиянию ассистированного осаждения на свойства упрочняющих ионно-плазменных покрытий, такие как фазовый состав, остаточные напряжения, эрозионная стойкость. Приведены результаты металлофизических исследований и испытаний на эрозионную стойкость монослойных и многослойных покрытий.

Ключевые слова: ионная имплантация, ассистированное осаждение, эрозионностойкое покрытие, ионно-плазменные покрытия.

D.A. Aleksandrov, S.A. Muboyadzhyan, D.S. Gorlov

INCREASING REINFORCING PROPERTIES OF ION-PLASMA COATINGS USING PLASMA ASSISTED DEPOSITION

The paper presents some results on the effect of assisted deposition (PA-PVD) on reinforcing properties of ion-plasma coatings, such as phase composition, lattice parameter, erosion resistance. The results metallophysical research, testing on erosion resistance of monolayer and multilayer coatings.

Keywords: ion implantation, PA-PVD, erosion-resistant coating, ion-plasma coatings.

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

Развитие авиационной техники, ее применение в условиях морского базирования и эксплуатации на грунтовых аэродромах обозначило необходимость коррозионной и эрозионной защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД [1]. Для решения этой проблемы в ВИАМ начаты работы по созданию ионно-плазменных эрозионно- и коррозионностойких покрытий, так как эксплуатация ответственных деталей ГТД без специальных покрытий ограничивала ресурс их работы, требовала замены лопаток при ремонте двигателей [2, 3]. Проблемы низких эрозионной и коррозионной стойкости лопаток компрессора ГТД из сталей и титановых сплавов выявили необходимость разработки принципиально новых защитных и упрочняющих покрытий и технологий их получения, обеспечивающих надежную работу лопаток в различных условиях их эксплуатации и не оказывающих заметного влияния на их прочностные характеристики.

В ВИАМ разработаны коррозионностойкое ионно-плазменное покрытие СДП-1+ВСДП-20, предназначенное для защиты стальных лопаток и других деталей компрессора от солевой коррозии при температуре до 600°C, а также упрочняющие покрытия на основе карбида хрома (Cr_3C_2) и нитрида циркония (ZrN), обеспечивающие работу соответственно стальных и титановых лопаток компрессора при пылевой эрозии в общеклиматических условиях эксплуатации [4].

В связи с созданием ГТД пятого поколения для обеспечения ресурса лопаток и других деталей компрессора актуальными являются повышение свойств упрочняющих эрозионностойких покрытий, а также создание нового класса эрозионно-коррозионностойких покрытий, многократно повышающих эрозионную стойкость защищаемой основы, работоспособных во всеклиматических условиях.

Большое внимание для повышения свойств защищаемой основы следует уделить подготовке поверхности подложки перед нанесением покрытий [5, 6]. Одним из процессов, повышающих коррозионную стойкость защищаемого материала, является ионное модифицирование поверхности [7], которое является новым направлением в вакуумно-плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ), разработанной в ВИАМ. Сущность процесса ионного модифицирования заключается в насыщении поверхностного слоя бомбардируемой подложки (на глубину до 30–40 мкм) ионами металлов (например, алюминием или титаном) или сплавов, создавая тем самым на поверхности модифицированный слой, насыщенный легирующими элементами, которой позволяет повысить коррозионную стойкость обрабатываемой основы [8]. Модифицированию

можно подвергать как саму подложку, так и верхние слои конденсированного покрытия с целью увеличения плотности приповерхностных слоев.

Другим методом, в настоящее время активно исследуемым в ВИАМ и позволяющим улучшить свойства как существующих, так и вновь создаваемых ионно-плазменных покрытий нового класса (2D-нанослойные, 3D-наноструктурные), является технология ионно-плазменного ассистированного осаждения. Данная технология реализована на ионно-плазменной установке МАП-3, разработанной в ВИАМ (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид ионно-плазменной установки МАП-3

Отличительной особенностью данной установки является наличие ионного ускорителя, позволяющего проводить бомбардировку поверхности растущего конденсата напыляемого покрытия ионами инертных и реактивных газов (например, аргона, азота, кислорода) с энергией ионов до 40 кэВ, обеспечивая тем самым периодическое ассистированное осаждение покрытия.

Известен способ ионной имплантации, позволяющий подобным ускорителем ионов изменять поверхностные слои конструкционных сталей или титановых сплавов, обеспечивая их сопротивление усталостному разрушению [9]. Периодическое ассистированное осаждение ионно-плазменных покрытий позволяет изменять структурно-фазовое состояние растущего конденсата покрытия, улучшая его свойства [10]. В данной работе приведены результаты по влиянию ассистированного осаждения на свойства серийных и новых комбинированных и нанослойных покрытий.

Материалы и методы

На ионно-плазменной установке МАП-3 на образцы $\varnothing 20$ мм, толщиной 2,5 мм из титановых сплавов ОТ4 и ВТ1-0 и стали ЭП866 нанесены следующие покрытия: серий-

ное ZrN, нанослойные TiC/CrC, TiN/CrN на основе чередующихся слоев из нитридов (карбидов) титана и хрома. Нанесение нанослойных покрытий проводилось при последовательном вакуумно-дуговом испарении составного катода из титана и хрома в атмосфере ацетилена и/или азота. В процессе нанесения покрытия контролировались такие параметры, как ток дуги (I , А), напряжение смещения на подложке (U , В), давление реакционного газа. Значения электрических параметров процесса напыления подбирались таким образом, чтобы не допустить перегрева подложки. Температура подложки контролировалась косвенно, при помощи термопары, находящейся при том же потенциале смещения, что и подложка. Покрытия наносились как с ассистированным осаждением ионами аргона, так и без осаждения. После нанесения покрытия на образцах-свидетелях проводили металлографические исследования, а также измеряли микротвердость покрытий. Металлографические исследования покрытий проводились на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV с энергодисперсионным анализатором INCA-450 при увеличениях $\times 2000$ – 50000 , а также на оптическом микроскопе фирмы Olimpus с цифровой системой обработки изображения при увеличениях до $\times 1000$. Микротвердость (H_μ) покрытия исследовали на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

Проведены испытания образцов с покрытиями на эрозионную стойкость для оценки защитных свойств разрабатываемых покрытий.

Оценка эрозионной стойкости ионно-плазменных покрытий осуществляется методом сравнительных испытаний на лабораторном стенде согласно ММ1.595-2-352-2008, разработанной в ВИАМ. Испытания проводили при лобовом (70 град) и касательном (20 град) угле атаки потоком абразивных частиц. В качестве эрозионной среды использовали речной кварцевый песок со средним (~ 300 – 350 мкм) и максимальным (700 мкм) размером частиц. Расчет эрозионного уноса проводили гравиметрическим методом путем взвешивания исходного образца и образца с покрытием после каждого цикла испытаний (эрозионная стойкость образца без покрытия принималась за единицу). Внешний вид стенда для проведения испытаний на относительную эрозионную стойкость показан на рис. 2.

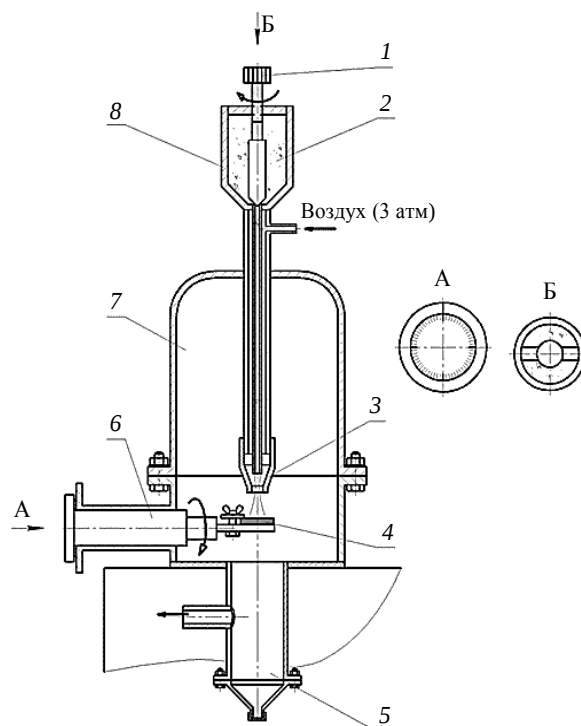


Рис. 2. Внешний вид стенда для испытаний на эрозионную стойкость:
 1 – регулировочный винт; 2 – засыпаемый абразив; 3 – безрасходное сопло; 4 – образец; 5 – выходной бункер; 6 – держатель образца; 7 – камера установки; 8 – засыпной бункер

Исследованы напряженное состояние покрытий, а также их фазовый состав. Металлофизические исследования (рентгенофазовый анализ (РФА) и определение остаточных напряжений (ОН) в покрытиях) проводили на дифрактометре D/MAX-2500 фирмы Rigaku с монохроматическим $\text{Cu } K_\alpha$ -излучением.

Результаты

Результаты испытаний на эрозионную стойкость образцов из титанового сплава ОТ4 с покрытием на основе нитрида циркония, нанесенного путем ассистированного осаждения ионами аргона, и без покрытия приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытаний на эрозионную стойкость покрытия
на основе нитрида циркония, нанесенного на образцы из сплава ОТ4**

Предварительная обработка поверхности	Покрытие образца	Толщина покрытия, мкм	Эрозионный(-ая) износ/ стойкость, отн. ед.	
			при угле атаки, град.	
			70	20
В исходном состоянии		–	1	1
Пескоструйная обработка	ZrN	19	0,033/30	0,06/16,6
	ZrN (АО)*	19	0,029/34	0,04/25

*АО – ассистированное осаждение ионами аргона.

Результаты испытаний на эрозионную стойкость образцов из титанового сплава ОТ4 с покрытием на основе нитрида циркония показывают, что ассистированное оса-

ждение ионами аргона увеличивают эрозионную стойкость системы «подложка–покрытие» на 12–40%.

Проведены испытания на эрозионную стойкость нанослойных покрытий TiC/CrC и TiN/CrN, нанесенных на образцы из стали ЭП866 и титанового сплава BT1-0 с ассистированным осаждением ионами аргона и без осаждения. Подробнее результаты исследования нанослойных покрытий изложены в работах [11, 12]. Испытания проводились при одинаковой толщине получаемых нанослоев. Результаты проведенных испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний на эрозионную стойкость нанослойных покрытий, нанесенных на образцы из титанового сплава BT1-0 и стали ЭП866

Предварительная обработка поверхности	Покрытие	Толщина, нм/мкм	Эрозионный износ, отн. ед., и состояние образца с покрытием, нанесенным на материал основы				Микротвердость покрытия**, МПа
			сплав ВТ1-0		сталь ЭП866		
			при угле атаки, град				
			70	20	70	20	
Пескоструйная обработка	TiC/CrC	70/18	1,24 повреждение покрытия после 2-го цикла	0,5 выдержал 3 цикла	1,66 повреждение покрытия после 2-го цикла	0,47 выдержал 3 цикла	27110/23690
	TiC/CrC (АО)*	70/18	0,16	0,125	0,39 мелкий скол покрытия после 3-го цикла	0,2 прошел 3 цикла	–
			выдержал 3 цикла				
Пескоструйная обработка + виброгалтовка	TiC/CrC (АО)*	70/18	0,1	0,075	0,085	0,13	–
			выдержал 3 цикла				
	TiN/CrN (АО)*	70/16	0,042	0,025	0,15	0,17	–
выдержал 3 цикла							

*АО – ассистированное осаждение ионами аргона.

** Микротвердость покрытия, нанесенного на титановый сплав BT1-0, – в числителе; на сталь ЭП866 – в знаменателе.

Результаты испытаний на эрозионную стойкость покрытий TiC/CrC и TiN/CrN показывают, что ассистированное осаждение повышает эрозионную стойкость нанослойного покрытия TiC/CrC в 7–12 раз. Установлено также положительное влияние на эрозионную стойкость предварительной обработки поверхности виброгалтовкой перед нанесением покрытия. Микроструктура нанослойных покрытий TiC/CrC и TiN/CrN приведена на рис. 3.

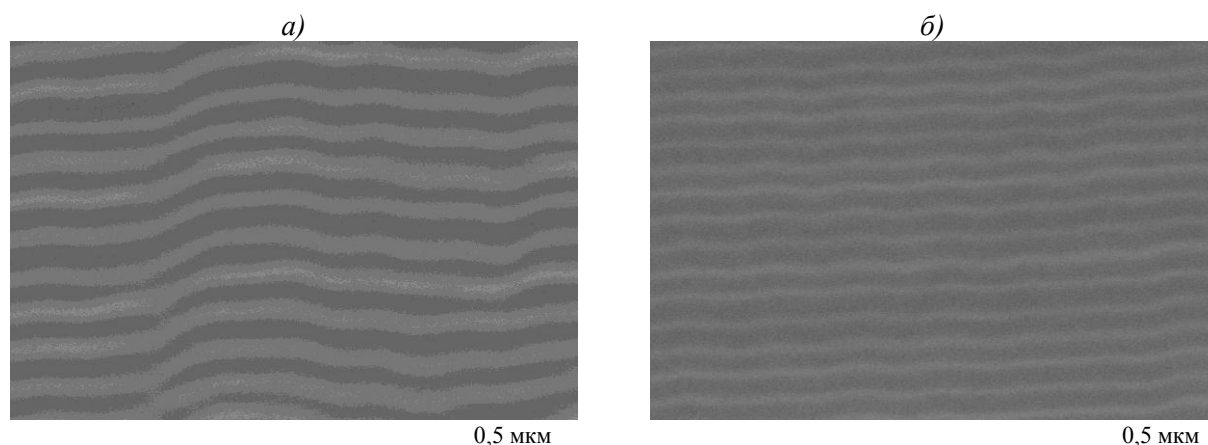


Рис. 3. Микроструктура нанослойных покрытий TiC/CrC (а) и TiN/CrN (б)

Проведены исследования фазового состава нанослойных покрытий TiC/CrC и TiN/CrN и определен уровень остаточных напряжений в них. Результаты металлофизических исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследований фазового состава покрытий на образцах из титанового сплава BT1-0

Предварительная обработка поверхности*	Покрытие	Результаты фазового анализа	Фаза	Остаточные напряжения сжатия σ , МПа
Пескоструйная обработка	TiC/CrC	TiC (ГЦК), две модификации Cr_3C_2 (орто-фазы)	TiC Cr_3C_2	1560±560 0**
	TiC/CrC (АО)*	TiC (ГЦК), Cr_7C_3 (орто-фазы), возможны следы Cr_3C_2	TiC Cr_7C_3	969±48 0**
Пескоструйная обработка + (6 ч)	TiC/CrC (АО)*	TiC (ГЦК), Cr_7C_3 (орто-фазы), возможны следы Cr_3C_2	TiC Cr_7C_3	1204±127 0**
Виброгалтовка	TiN/CrN (АО)*	TiN (ГЦК), CrN (ГЦК), следы Cr_2N (гексагональная), следы Ti_2N (тетрагональная)	TiN CrN	916±41 774±207

*АО – ассистированное осаждение ионами аргона.

**Погрешность при определении напряжений сопоставима с определяемой величиной.

Результаты исследований фазового состава покрытия TiC/CrC показывают, что ассистированное осаждение ионами аргона изменяет фазовый состав (в фазе CrC – Cr_3C_2 меняется на Cr_7C_3) и снижает уровень остаточных напряжений. Более подробно металлофизические исследования нанослойных покрытий изложены в работах [13, 14]. В работах [15, 16] проведены исследования на эрозионную и коррозионную стойкость различных эрозионностойких и коррозионностойких комбинированных нанослойных покрытий, полученных с помощью ассистированного осаждения. Влияние ассистированного осаждения различными газами (помимо аргона) на жаростойкость и коррозионную стойкость ионно-плазменных покрытий [17] требует дальнейшего всестороннего исследования.

Обсуждение и заключения

Проведены исследования влияния ассистированного осаждения на ионно-плазменные покрытия ZrN, TiC/CrC, TiN/CrN. Установлено, что ассистированное осаждение ионами аргона увеличивает эрозионную стойкость ионно-плазменных монослойных, и в большей мере нанослойных покрытий. Установлено также влияние ассистированного осаждения на фазовый состав и уровень остаточных напряжений в нанослойных покрытиях. Вопрос влияния ассистированного осаждения на коррозионную стойкость, жаростойкость ионно-плазменных покрытий требует дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP4. С. 13–19.
2. 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.
3. 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.
4. Мубояджян С.А., Помелов Я.А. Защитные покрытия для лопаток компрессора ГТД /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства». М.: ВИАМ. 2003. С. 116–131.
5. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.
6. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов с целью обеспечения адгезионных свойств //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 25–35.
7. 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.

8. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности /В сб. Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2006. №1. С. 42–53.
9. Ajeet Rohatgia, Meiera D.L., McPherson B., Ajay D. Upadhyaya, Francesco Zimbardi, Young-Woo Ok, Ajay D. Upadhyaya, Jiun-Hong Lai. High-Throughput Ion-Implantation for Low-Cost High-Efficiency Silicon Solar Cells //Energy Procedia. 2012. V. 15. P. 10–19.
10. Cassara G., Banfielda S., Avelar-Batista Wilson J.C., Housden J., Matthews A., Leyland A. Tribological properties of duplex plasma oxidised, nitrided and PVD coated Ti–6Al–4V //Surface and Coatings Technology. 2011. V. 206. №2–3. P. 395–404.
11. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Ионно-плазменные нанослойные эрозионно-стойкие покрытия на основе карбидов и нитридов металлов //Металлы. 2010. №5. С. 39–51.
12. 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. 3–7.
13. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С., Журавлева П.Л. Исследование свойств нанослойных эрозионностойких покрытий на основе карбидов и нитридов металлов //Металлы. 2011. №4. С. 91–101.
14. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Коннова В.И. Повышение эрозионной и коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД с помощью нанослойного покрытия //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №4. С. 1–7.
15. 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. №5. С. 71–81.
16. Белоус В.Я., Варламова В.Е., Мубояджян С.А., Александров Д.А. Ионно-плазменные покрытия для защиты от коррозии компрессорных лопаток и других деталей ГТД, эксплуатирующихся во всеклиматических условиях //Коррозия: материалы, защита. 2012. №1. С. 20–24.

17. Swadźba L., Formanek B., Gabriel H.M., Liberski P., Podolski P. Erosion and corrosion-resistant coatings for aircraft compressor blades //Surface and Coatings Technology. 1993. V. 62. №1–3. P. 486–492.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokotepλονagruzhennyh de-talej gazoturbinnyyh dvigatelej [Materials for the high-heatloaded details of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP4. S. 13–19.
2. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
3. Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Smirnov A.A. Poluchenie keramicheskikh teplozashhitnyh pokrytij dlja rabochnih lopatok turbin aviacionnyh GTD magnetronnym metodom [Receiving ceramic heat-protective coatings for working blades of turbines of aviation GTD magnetronny method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. C. 3–8.
4. Mubojadzhjan S.A., Pomelov Ja.A. Zashhitnye pokrytija dlja lopatok kompressora GTD [Protecting covers for GTD compressor blades] /V sb.: Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Vysokozharoprochnye materialy dlja sovremennyh i perspektivnyh gazoturbinnyyh dvigatelej i progressivnye tehnologii ih proizvodstva». M.: VIAM. 2003. S. 116–131.
5. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaja N.A. Vlijanie rezhimov termicheskoy obrabotki na strukturu i svojstva zharoprochnogo titanovogo splava dlja lopatok KVD [Influence of modes of thermal processing on structure and property of heat resisting titanium alloy for KVD blades] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 8–14.
6. Sibileva S.V., Karimova S.A. Obrabotka poverhnosti titanovyh splavov s cel'ju obespechenija adgezionnyh svojstv [Surface treatment of titanium alloys for the purpose of ensuring adhesive properties] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S2. S. 25–35.
7. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Ionnoe travlenie i modifizirovanie poverhnosti otvetstvennyh detalej mashin v vakuumno-dugovoj plazme [Ion etching and modifying of sur-

- face of responsible details of machines in vacuum and arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.Je. Bauman. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 149–163.
8. Mubojadzhjan S.A., Lucenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Issledovanie vozmozhnosti povyshenija sluzhebnykh harakteristik lopatok kompressora GTD metodom ionnogo modifizirovaniya poverhnosti [Research of possibility of increase of office characteristics of compressor blades of GTD by method of ionic modifying of surface] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. M.: VIAM. 2006. №1. S. 42–53.
 9. Ajeet Rohatgia, Meiera D.L., McPherson B., Ajay D. Upadhyaya, Francesco Zimbardi, Young-Woo Ok, Ajay D. Upadhyaya, Jiun-Hong Lai. High-Throughput Ion-Implantation for Low-Cost High-Efficiency Silicon Solar Cells //Energy Procedia. 2012. V. 15. P. 10–19.
 10. Cassara G., Banfield S., Avelar-Batista Wilson J.C., Housden J., Matthews A., Leyland A. Tribological properties of duplex plasma oxidised, nitrided and PVD coated Ti–6Al–4V //Surface and Coatings Technology. 2011. V. 206. №2–3. P. 395–404.
 11. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Ionno-plazmennye nanoslojnye jerozion-no-stojkie pokrytija na osnove karbidov i nitridov metallov [Ion-plasma nanolayer erosive and resistant coverings on the basis of carbides and nitrides of metals] //Metally. 2010. №5. S. 39–51.
 12. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanoslojnye uprochnjajushhie pokrytija dlja zashhity stal'nykh i titanovykh lopatok kompressora GTD [Nanolayer strengthening coverings for protection of steel and titanic compressor blades of GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 3–7.
 13. Mubojadzhjan S.A., Lucenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Zhuravleva P.L. Issledovanie svojstv nanoslojnykh jerozionnostojkikh pokrytij na osnove karbidov i nitridov metallov [Research of properties of nanolayer erozionnostoyky coverings on the basis of carbides and nitrides of metals] //Metally. 2011. №4. S. 91–101.
 14. Aleksandrov D.A., Mubojadzhjan S.A., Gorlov D.S., Konnova V.I. Povysenie jerozionnoj i korrozionnoj stojkosti stal'nykh lopatok kompressora GTD s pomoshh'ju nanoslojnogo pokrytija [Increase of erosion and corrosion resistance of steel compressor blades of GTD by means of nanolayer covering] //Problemy chernoj metallurgii i materialovedenija. 2013. №4. S. 1–7.
 15. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennykh detalej kompressora GTD [Protective and strengthening ion-plasma coverings

for blades and other responsible details of the GTD compressor] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 71–81.

16. Belous V.Ja., Varlamova V.E., Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A. Ionno-plazmennye po-krytija dlja zashhity ot korrozii kompressornyh lopatok i drugih detalej GTD, jekspluatirujushhihsja vo vseklimatecheskih uslovijah [Ion-plasma coverings for corrosion protection of compressor blades and other details of GTD which are maintaining in vseklimatechesky conditions] //Korrozija: materialy, zashhita. 2012. №1. S. 20–24.
17. Swadźba L., Formanek B., Gabriel H.M., Liberski P., Podolski P. Erosion and corrosion-resistant coatings for aircraft compressor blades //Surface and Coatings Technology. 1993. V. 62. №1–3. P. 486–492.