

УДК 669.295

Д.А. Александров¹, С.А. Мубояджян¹, А.Н. Луценко¹, П.Л. Журавлева¹

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И ИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39

Рассмотрены вопросы упрочнения поверхности титанового сплава методами ионной имплантации азотом и ионным насыщением (ионным модифицированием) поверхности в плазме алюминиевого сплава. Проведены исследования микротвердости упрочненной поверхности, эрозионной и абразивной стойкости, исследован фазовый состав, проведены металлографические исследования. Показано, что применение данного вида комплексной ионной обработки увеличивает стойкость поверхности титанового сплава к эрозионному и абразивному износу. Результаты исследований могут быть использованы для упрочнения входной кромки титановых лопаток компрессора ГТД.

Ключевые слова: лопатки компрессора ГТД, ионная имплантация, ионное модифицирование, эрозионная стойкость, эрозионностойкие покрытия, ионно-плазменные покрытия.

D.A. Aleksandrov¹, S.A. Muboyadzhyan¹, A.N. Lutsenko¹, P.L. Zhuravleva¹

HARDENING OF THE SURFACE OF TITANIUM ALLOYS BY ION IMPLANTATION METHOD AND IONIC MODIFICATION

The problems of hard surfacing a titanium alloy by ion implantation method with nitrogen and ionic saturation (ionic modification) of a surface in an aluminum alloy plasma are considered in the article. The microhardness of the hardened surface, erosion and abrasion resistance, the phase composition have been studied and metallographic studies have been carried out. It is shown that the use of this type of complex ion treatment increases the resistance of the surface of the titanium alloy to erosive and abrasive wear. The results of the research can be used to harden the input edge of titanium blades of the GTE compressor.

Keywords: gas turbine compressor blades, ion implantation, ion modifying, erosion resistance, erosion-resistant coatings, 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

Ионная имплантация и ионное модифицирование – процессы, используемые для упрочнения ответственных деталей из конструкционных сталей и сплавов. Ионное модифицирование позволяет повышать эксплуатационные свойства защищаемых деталей путем легирования сплава основы на глубину от нескольких до десятков микрометров. Ионное модифицирование поверхности достигается путем насыщения поверхностных слоев обрабатываемой детали ионами материала покрытия без образования конденсированного слоя на ее поверхности. Процесс ионного модифицирования поверхности обрабатываемого изделия является одним из трех ионно-плазменных процессов (помимо ионного травления и конденсации) при вакуумно-дуговом нанесении покрытия и зависит от конкретного соотношения величин тока дуги и напряжения смещения на обрабатываемом изделии.

Ионное модифицирование позволяет изменять структурно-фазовое состояние и физико-химические свойства поверхности обрабатываемого изделия, обеспечивая повышение служебных свойств ответственных деталей ГТД – в частности, лопаток компрессора [1, 2]. В процессе вакуумно-дугового осаждения покрытия при фиксированном значении тока дуги (I , А) и увеличении напряжения смещения (U , В) на поверхности детали процесс конденсации покрытия из материала катода постепенно переходит в процесс травления конденсируемого слоя, а далее – в процесс ионного травления поверхности детали, одновременно с этим процессом имеет место насыщение поверхностных слоев детали ионами испаряемого материала катода. В зависимости от температуры на подложке это может вызывать образование растворов замещения в кристаллической структуре или новых фаз, которые могут существенно изменить как свойства поверхностных слоев

(повысить твердость, изменить напряженно-деформированное состояние), так и свойства всей детали в целом, – например, повысить сопротивляемость усталости или коррозионным процессам. Ионная имплантация поверхности изделия из титанового сплава высокоэнергетическими ионами газа азота (N_2) позволяет повысить выносливость обрабатываемых деталей [3, 4].

Ионная имплантация позволяет изменять структурно-фазовое состояние поверхностного слоя обрабатываемого изделия путем «бомбардировки» поверхности ионами газа (или металла) высокой энергии – свыше 15–20 кэВ. При этом имеет место внедрение имплантируемых ионов в поверхность на глубину от 0,2 до 1 мкм в зависимости от их энергии, что и является причиной изменения структурно-фазового состояния поверхностного слоя обрабатываемого изделия. Возможно формирование твердых растворов внедрения с одновременным изменением параметров кристаллической решетки, формирование новых фаз на основе материала основы и имплантируемых атомов. Ионная имплантация азотом титановых сплавов перед нанесением упрочняющего покрытия из TiN увеличивает сопротивление усталости лопатки за счет изменения дислокационной структуры ее поверхности и параметров решетки поверхностного слоя, а также образования упрочняющих нитридных фаз типа TiN и Ti_2N , – как и в случае с ионным модифицированием, при котором образуются упрочняющие интерметаллидные фазы в поверхностном слое, что приводит к увеличению микротвердости обрабатываемой поверхности и увеличивает ее стойкость к эрозионному износу.

Лопатки компрессора вертолетного двигателя подвергаются абразивному воздействию частиц песка из пылевоздушного потока [5], что приводит к эрозии поверхности лопаток. При воздействии крупных частиц грунта (>1 мм) на профиль лопатки происходит ударное воздействие, при размере частиц ($<0,7$ мм) – эрозионный износ. Механизмы воздействия частиц абразива «крупной» и «мелкой» фракций с поверхностью лопатки различаются, если в первом случае происходит в основном нагартовывание поверхности и накопление напряжений с возможностью образования трещин усталости, то в другом случае происходит постепенный эрозионный износ поверхности [6]. Защита от эрозионного износа титановых лопаток компрессора вертолетного двигателя достигается благодаря применению эрозионностойких покрытий на основе нитридов металлов типа TiN и ZrN, которые обеспечивают многократное повышение эрозионной стойкости. Одной из самых изнашиваемых частей лопатки компрессора является выходная кромка. Износ происходит по входной и выходной кромкам лопаток, причем в основном из-за износа выходной кромки лопаток изменяется их хорда и рабочие

лопатки изнашиваются в большей мере, чем лопатки направляющего аппарата. Частицы пыли, попадая в проточную часть ГТД, приводят к изменению геометрических размеров лопаточных венцов и радиальных зазоров, поэтому изучение процесса протекания износа и методов упрочнения поверхности компрессорных лопаток позволит повысить надежность ГТД в целом.

Газоабразивный износ лопаток компрессора ГТД происходит преимущественно на земле или вблизи земли и вызывается в основном сферическими (окатанными) частицами кварцевого песка размером ~ 100 мкм. Концентрация частиц в потоке доходит до 1 г/м^3 . Следует заметить, что кромки лопаток имеют кривизну по сравнению с остальной частью лопаток, что создает на кромках отличное от других частей напряженно-деформированное состояние. Это оказывает влияние на адгезионную прочность защитных покрытий на входной кромке, особенно в условиях абразивного воздействия. В отличие от износостойких покрытий [7], где для повышения контактного износа важны микротвердость, жаростойкость покрытия и формирование напряжений сжатия, в случае эрозионной стойкости важна когезионная и адгезионная прочность для сопротивления множественным ударам окатанных частиц со скоростями ≥ 200 м/с. Это снижает эрозионную и абразивную стойкость покрытия на входной кромке лопаток ГТД. В данной статье для повышения стойкости кромок титановых лопаток компрессора ГТД к абразивному (ударному) износу использованы методы ионной имплантации и ионного модифицирования для упрочнения самой поверхности титановой лопатки, включая входную и выходную кромки.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [8].

Материалы и методы

Для проведения упрочняющей обработки использовали дисковые образцы $\varnothing 20$ мм из титанового сплава ВТ6. Упрочнение поверхности образцов проводили на ионно-плазменной установке МАП-3, разработанной во ФГУП «ВИАМ». Ионную имплантацию проводили ионами азота с помощью ионного ускорителя «ПИОН» с одновременной подачей потенциала смещения на подложку для повышения эффективности имплантации вследствие плазменно-иммерсионных процессов [9, 10]. Модифицирование поверхности в плазме алюминиевого сплава проводили в диапазоне напряжения смещения, обеспечивающего

превалирование процесса насыщения поверхности над процессом конденсации. После проведения упрочняющей обработки проводили металлографические исследования на оптическом микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения при разрешениях $\times 500$ и $\times 1000$. Фазовый анализ выполнен методом рентгеновской дифракции с применением монокроматического $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучения ($\lambda=0,15418$ нм) в диапазоне (20–100 град)/ 2θ с шагом $\Delta 2\theta=0,016$ град и выдержкой 40 с на точку (дифрактометр Empyrean). Расшифровка дифрактограмм проведена с помощью специализированной программы HighScore и базы данных PDF-2. Дифрактограммы представлены в координатах интенсивности от углового положения 2θ . Элементный состав определяли на сканирующем электронном микроскопе фирмы Hitachi.

Определение микротвердости поверхности образцов проводили на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450–76 при нагрузке 50 г. Испытания на эрозионную стойкость проводили по ММ1.595-2-352–2008 при касательном обтекании абразивного потока (20 град) к поверхности образца, в качестве материала использовали кремниевый песок средней фракции 300–350 мкм, испытания проводили в течение 3 циклов при давлении 3 ат (0,3 МПа). Общая масса абразивного материала составила 1,2 кг. Для испытаний на стойкость к абразивному износу (удару) разработана экспериментальная методика, имитирующая воздействие крупных абразивных частиц на входную кромку лопаток. В качестве абразивного материала использовали дробленый металлический кремний со средней фракцией частиц 0,7–1,2 мм. Угол воздействия абразивного потока к образцу составлял 90 град при давлении воздуха 5 ат (0,5 МПа), общая масса абразивного материала за испытание составила 0,13 кг. В обеих методиках износ определяли гравиметрическим методом в сравнении с исходным образцом без упрочняющей обработки.

Результаты

Ионно-плазменная обработка поверхности титанового сплава ВТ6 проведена на установке

МАП-3 в нескольких вариантах: ионное модифицирование алюминием в режиме «травление основы+насыщение поверхности+частичная конденсация покрытия», ионное модифицирование алюминием в режиме «травление основы+насыщение поверхности», ионная имплантация азотом с одновременной подачей потенциала смещения на изделие и комбинированная обработка, совмещающая ионную имплантацию азотом с последующим отжигом при нагреве основы на завершающей стадии ионного модифицирования в плазме алюминиевого сплава при включенном процессе ионной имплантации. Алюминиевый сплав для ионного модифицирования титана выбран вследствие того, что титан образует с алюминием твердые интерметаллидные фазы, имеющие высокие механическую прочность и твердость [11, 12]. После обработки образцов из титанового сплава ВТ6 проведены гравиметрические исследования. Результаты исследований после различных обработок приведены в табл. 1.

Показано, что в первом случае на образцах наблюдается небольшой привес, что свидетельствует о формировании конденсированного слоя алюминиевого сплава на поверхности образцов. В дальнейшем при увеличении напряжения смещения процесс конденсации алюминиевого сплава на титановую подложку отсутствует и имеет место процесс травления основы и термодиффузионное насыщение поверхности в плазме алюминиевого сплава [13]. Ионная имплантация азотом и комбинированный вариант обработки с кратковременным модифицированием в плазме алюминиевого сплава в режиме «травление основы+насыщение поверхности» не выявили изменения массы образцов.

На рис. 1 приведены микроструктуры поверхности образцов после различных видов обработки. Представленные микроструктуры подтверждают данные гравиметрического исследования: на рис. 1, а наблюдаются небольшой конденсированный слой (~1 мкм) и измененная зона глубиной до 5 мкм. На остальных микроструктурах наблюдается только измененный поверхностный слой.

Таблица 1

Результаты гравиметрического исследования образцов из титанового сплава ВТ6 после различных видов обработок в установке МАП-3

Варианты упрочняющей обработки	Удельное изменение массы, мг/см ²
Ионное модифицирование алюминием в режиме «травление основы+насыщение поверхности+частичная конденсация покрытия»	0,54
Ионное модифицирование алюминием в режиме «травление основы+насыщение поверхности»	-1,22
Ионная имплантация азотом	0
Имплантация ионами азота+кратковременное модифицирование в плазме алюминиевого сплава в режиме «травление основы+насыщение поверхности»	0

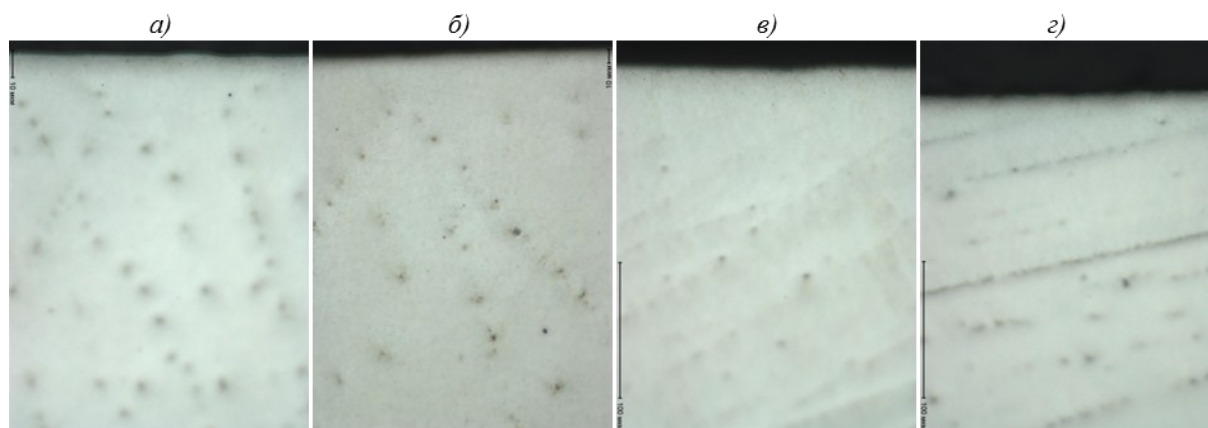


Рис. 1. Модифицирование в плазме алюминиевого сплава:
 а – режим «насыщение поверхности» ($\times 1000$); б – режим «травление основы+насыщение поверхности» ($\times 500$); в – имплантация ионами азота ($\times 500$); з – имплантация ионами азота+модифицирование в плазме алюминиевого сплава ($\times 500$)

В табл. 2 приведены результаты испытаний на абразивную стойкость по экспериментальной методике и определение микротвердости поверхностного слоя образцов.

Результаты испытаний на абразивную стойкость показывают, что преимущество при данной методике испытаний (имитирующей условия на входной кромке лопаток) имеют виды обработки, которые не создают на поверхности основы конденсированный слой, так как однородная поверхность без границы раздела более устойчива к аб-

разивному воздействию в условиях напряженного состояния [14]. Наиболее приемлемым вариантом по комплексу свойств является комбинированная обработка имплантацией и модифицированием в плазме алюминиевого сплава.

Проведены испытания на эрозионную стойкость образцов из сплава ВТ6 после комбинированной обработки. Испытания проводили по ММ1.595-2-352-2008 при касательном воздействии пылевоздушного потока. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 2
 Результаты испытаний на абразивную стойкость и микротвердость поверхностного слоя образцов из сплава ВТ6 после различных видов обработки на установке МАП-3

Упрочняющая обработка	Унос массы, мг	Увеличение относительной абразивной стойкости, раз	Микротвердость $H_{\text{н}50}$, кгс/мм ²
В исходном состоянии	3,5	1*	336
Ионное модифицирование алюминием в режиме «травление основы+насыщение поверхности+частичная конденсация покрытия»	3,2	1,09	309
Ионное модифицирование алюминием в режиме «травление основы+насыщение поверхности»	2	1,75	292
Ионная имплантация азотом	0,8	4,38	382
Имплантация ионами азота+модифицирование в плазме алюминиевого сплава	0,8	4,38	507
TiN-покрытие**	15,5	0,225	3300

* Относительная абразивная стойкость материала основы принимается за единицу.
 ** Для сравнения приведены данные по покрытию из нитрида титана толщиной 15–17 мкм, полученному на установках типа МАП.

Таблица 3
 Эрозионная стойкость образцов из сплава ВТ6 после комбинированной обработки

Упрочняющая обработка	Эрозионная стойкость при касательном обтекании (20 град)	
	унос массы, мг	увеличение относительной эрозионной стойкости, раз
В исходном состоянии	6,72	1*
Имплантация ионами азота+ модифицирование в плазме алюминиевого сплава	1,1	6,1

* Относительная эрозионная стойкость материала основы принимается за единицу.

Таблица 4

Фазовый состав поверхности из титанового сплава ВТ6 с упрочняющей обработкой

Упрочняющая обработка	Фазовый состав	Параметры решетки
В исходном состоянии	α -Ti (ГПУ), β -Ti (ОЦК)	β -Ti: $a=0,32626$ нм α -Ti: $a=0,29380$ нм, $c=0,46794$ нм
Комбинированная	α -Ti (ГПУ), β -Ti (ОЦК), Al, Ti_2N (следы)	β -Ti: $a=0,32445$ нм α -Ti: $a=0,29327$ нм, $c=0,46783$ нм

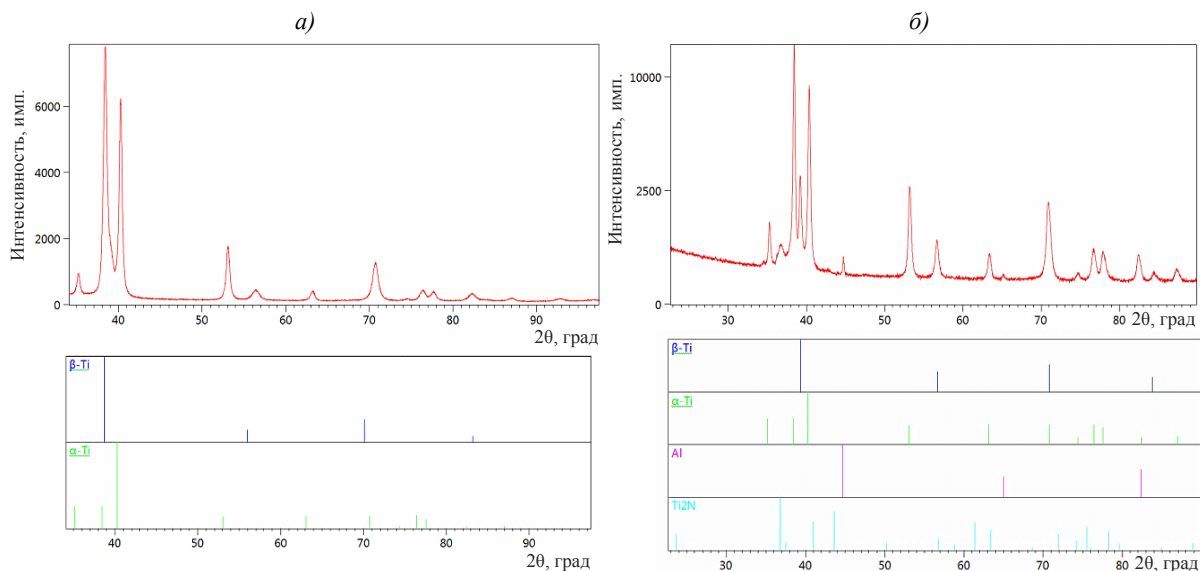


Рис. 2. Рентгенограммы образцов из сплава ВТ6 (а) и сплава ВТ6 с комбинированной упрочняющей обработкой (б)

Показано, что в условиях касательного обтекания эрозионного потока комбинированная упрочняющая обработка повышает эрозионную стойкость поверхности титанового сплава.

Проведены исследования фазового состава образцов из титанового сплава ВТ6 до упрочняющей обработки и после нее. Результаты исследований фазового состава приведены в табл. 4, рентгенограммы представлены на рис. 2.

По результатам исследований фазового состава установлено, что в поверхностном слое образца с комбинированной упрочняющей обработкой кроме фаз исходного состава (α -Ti, β -Ti) присутствуют следы Al и фазы Ti_2N . Из данных табл. 4 видно, что после упрочняющей обработки период фаз α -Ti и β -Ti уменьшается, что может быть связано с накоплением сжимающих напряжений в результате формирования фазы на основе Ti_2N [15].

На рис. 3 приведены результаты элементного анализа образца из сплава ВТ6 с комбинированной упрочняющей обработкой. Данные элементного анализа показывают, что алюминий в результате обработки проникает в поверхность на глубину до 3 мкм. Активное внедрение алюминия в поверхность титановой основы вместе с ионной имплантацией позволило существенно упрочнить поверхность титанового сплава, что подтверждается данными по определению микротвердости поверхности.

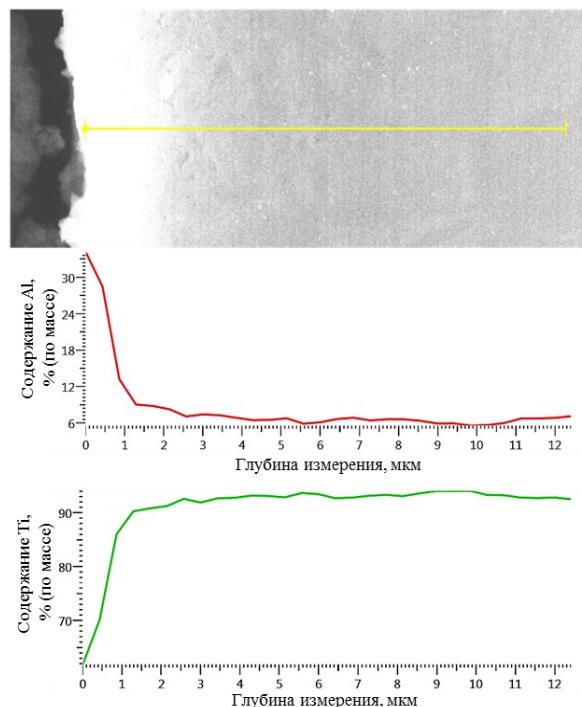


Рис. 3. Распределение ($\times 20000$) алюминия и титана по глубине поверхности образца из сплава ВТ6 после комбинированной упрочняющей обработки

Обсуждение и заключения

Показано, что применение комбинированной упрочняющей обработки в виде имплантации ионами азота с модифицированием в плазме алюминиевого сплава увеличивает стойкость к абразивному воздействию поверхности более чем в 4 раза. Микротвердость поверхности увеличивается в 1,5 раза, а также увеличивается стойкость поверхности к эрозионному износу (при касательном обтекании пылевоздушным потоком). Установлено, что эффект упрочнения достигается именно за счет изменения поверхностного слоя обрабатываемого изделия, так как его когезионная прочность выше адгезионной прочности эрозионностойкого покрытия, которое разрушается под воздействием крупных частиц (что и происходит в реальных условиях на входных кромках компрессора вертолетного ГТД). Отсутствие конденсированного слоя покрытия при упрочнении поверхности не будет заметно изменять декремент колебания лопаток компрессора и ухудшать демпфирующую способность лопатки [16, 17]. Насыщение поверхностных слоев азотом при ионной имплантации увеличивает сопротивление зарождению микротрещин вследствие увеличения сжимающих напряжений, что повышает выносливость изделий на основе титана [18, 19].

Следует отметить, что особое внимание при ионной обработке титановой основы алюминиевым сплавом необходимо уделить подбору электрических параметров процесса ионной обработки поверхности, особенно на режимах модифицирования, так как существует риск перегрева титановой основы.

Существенное повышение микротвердости обработанной поверхности (до 1,5 раз) и снижение параметров решетки фаз α -Ti и β -Ti (табл. 4) может являться следствием твердорастворного упрочнения титановой основы [20].

Проведенное исследование показывает, что совмещение методов ионной имплантации и ионного модифицирования позволяет упрочнить поверхность титановых сплавов без создания конденсированного слоя покрытия, что дает возможность использовать эту технологию для упрочнения входной кромки титановых лопаток компрессора вертолетного ГТД. Следует отметить, что данная технология не заменяет эрозионностойкое покрытие, так как упрочняемая глубина поверхности с использованием комбинированной обработки не превышает нескольких микрометров, а полученная микротвердость в несколько раз меньше, чем у металлокерамического покрытия на основе нитрида титана (507 против 3300 кгс/мм²). Однако данная технология может дополнять известные эрозионностойкие покрытия, обеспечивая стойкость к эрозионному износу там, где оно не столь эффективно (на входной кромке лопатки компрессора). Вследствие изменения фазового состава и напряженного состояния упрочненной поверхности необходима корректировка режимов нанесения и конструкции широко применяемых покрытий на основе нитрида титана и нитрида циркония для совмещения обеих технологий – упрочнения поверхности и нанесения конденсированного эрозионностойкого покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смыслов А.М., Смылова М.К., Мухин В.С. Ионно-имплантационное и вакуумно-плазменное модифицирование поверхности лопаток компрессора ГТД // Вестник Рыбинской гос. авиац. технологич. акад. им. П.А. Соловьева. 2017. №1 (40). С. 133–138.
2. 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.
3. Смыслов А.М., Быбин А.А., Невьянцева Р.Р. Влияние ионной имплантации и плазменной поверхностной обработки на эксплуатационные характеристики жаропрочного никелевого сплава // Физика и химия обработки материалов. 2007. №3. С. 29–34.
4. Смыслов А.М., Смылова М.К., Дубин А.И. Исследование влияния комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки на сопротивление усталости лопаток ГТД с концентратором // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20. №3 (73). С. 38–43.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 13–19.
6. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Коннова В.И. Методика испытаний на относительную эрозионную стойкость твердых покрытий ответственных деталей компрессора ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. №4. С. 7–18.
7. Погребняк А.Д., Якущенко И.В., Соболев О.В. и др. Влияние остаточного давления и ионной имплантации на структуру, элементный состав и свойства нитридов (TiZrAlYNb)N // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. №8. С. 72–79.
8. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.

9. Карпов Д.А., Литуновский В.Н. Плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ПИИИ): физические основы, использование в технологиях. СПб.: НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 2009. 62 с.
10. Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С. и др. Иммерсионная ионная имплантация и азотирование в плазме тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №6. С. 43–48.
11. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Исследование влияния содержания легирующих элементов на свойства высокопрочного жаропрочного псевдо- α -сплава ВТ46 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6.
12. Сутыгина А.Н., Шулепов И.А. Плазменно-иммерсионная ионная имплантация алюминия в титан ВТ1-0 // Перспективы развития фундаментальных наук: сб. науч. тр. XII Междунар. конф. студентов и молодых ученых. Томск: Нац. исслед. Томский политех. ун-т, 2015. С. 248–250.
13. Воробьев В.Л., Быков П.В., Быстров С.Г. и др. Изменение состава поверхностных слоев титанового сплава ВТ6 после ионно-лучевого перемешивания алюминия и термообработки // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. №4. С. 576–581.
14. Учваткина Н.В., Овчинников В.В., Жданович О.А., Сбитнев А.Г. Комбинированная технология повышения износостойкости деталей из титанового сплава ВТ6 на основе ионной имплантации // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №6 (138). С. 35–39.
15. Учваткина Н.В., Овчинников В.В., Жданович О.А., Сбитнев А.Г. Остаточные напряжения в поверхностном слое титанового сплава ВТ6 после ионной имплантации с большой дозой // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. №6. С. 41–46.
16. Горлов Д.С., Мубояджян С.А., Щепилов А.А., Александров Д.А. Влияние ионной имплантации на демпфирующую способность композиции «сплав–ионно-плазменное покрытие» // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-4-4.
17. Горлов Д.С., Щепилов А.В. Влияние шероховатости поверхности и абразивного износа на демпфирующую способность композиции «сплав–покрытие» // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №5. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-11-11.
18. Горбовец М.А., Ночовная Н.А. Влияние микроструктуры и фазового состава жаропрочных титановых сплавов на скорость роста трещины усталости // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №4. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-3-3.
19. Шаркеев Ю.П., Кукареко В.А., Ерошенко А.Ю. и др. Ионная имплантация как метод повышения циклической долговечности титана в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях // Перспективные материалы. 2011. №12. С. 136–142.
20. Шаркеев Ю.П., Рябчиков А.И., Козлов Э.В. и др. Высокоинтенсивная ионная имплантация – метод формирования мелкодисперсных интерметаллидов в поверхностных слоях металлов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2004. Т. 47. №9. С. 44–52.