

УДК 620.173.21

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И УРОВЕНЬ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ Ti-TiN и Ti-TiVN ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А. М. Смыслов¹, Ю. М. Дыбленко², К. С. Селиванов³,
В. С. Жернаков⁴, А. И. Дубин⁵

¹smyslovam@yandex.ru, ²tm@usatu.ru, ³k.selivanov@mail.ru, ⁴sm.ugatu@mail.ru, ⁵alexey.dubin@rambler.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 23.10.2019

Аннотация. Проведенные исследования посвящены вопросу повышения эксплуатационных свойств титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) путем комплексного упрочнения, включающего электролитно-плазменное полирование, ионную имплантацию азота и нанесение ионно-плазменных нитридных покрытий Ti-TiN и Ti-TiVN методом катодно-дугового осаждения (Arc-PVD). Исследованы механические свойства покрытий методом Scratch-test, проведена оценка адгезионной прочности, установлены величины остаточных (внутренних) напряжений. Обсуждается природа повышения прочности материала с точки зрения формирования «барьерного эффекта» в приповерхностных слоях металла в процессе пластической деформации.

Ключевые слова: ионно-плазменное покрытие; титановый сплав; остаточные напряжения; индентирование; адгезионная прочность.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных отраслей машиностроения предъявляет все более высокие требования к качеству и эксплуатационным свойствам конструкционных материалов и изделий, изготовленных из них. При этом во многих случаях весьма важным является сочетание различных свойств, например, малый удельный вес, высокие механическая и усталостная прочность, коррозионная и эрозионная стойкость. Это актуально для титановых сплавов, применяемых для изготовления таких ответственных изделий, как лопатки компрессора газотурбинного двигателя, работающих в экстремально сложных условиях термических, циклических нагрузок и агрессивной среды.

Детали компрессора ГТД в процессе эксплуатации испытывают агрессивные эрози-

онные и коррозионные воздействия, требующие защиты материала поверхности от ускоренного разрушения. Такая защита достигается различными методами упрочняющей обработки. Например, известны и широко применяются способы воздействия на поверхность детали концентрированными потоками энергии, к числу которых относится ионная имплантация и катодно-дуговое осаждение ионно-плазменных покрытий [1–4].

Кроме того, для изделий из титановых сплавов широко используются также вакуумно-плазменные покрытия на основе нитридов и карбидов тугоплавких элементов с целью повышения сопротивления коррозионным и эрозионным внешним воздействиям [5, 6]. В недавних исследованиях было показано, что использование подложки из чистого Ti (в т. ч. полученного методами

интенсивной пластической деформации) позволяет заметно повысить способность нитридных покрытий к сопротивлению нагрузкам за счет обеспечения их твердости и адгезионной прочности [7–9]. Одновременно с комплексом высоких физико-механических свойств в ионно-плазменных покрытиях формируются значительные сжимающие напряжения, приводящие, в некоторых случаях, к отслоению (скалыванию) части покрытия от подложки. При этом исследования взаимосвязи величины внутренних напряжений и механических свойств ионно-плазменных покрытий до сих пор не проводились. Предполагается, что регулированием величины внутренних напряжений, можно получать на поверхности титана более твердые и прочные покрытия, увеличивающие его эксплуатационные свойства [10].

В настоящей работе использован комбинированный подход к упрочнению сплава ВТ6 с целью исследования взаимосвязи внутренних напряжений и механических свойств ионно-плазменных покрытий. Особое внимание уделялось минимизации величин остаточных напряжений в материале подложки перед упрочнением. Для снятия напряжений образцы подвергали термической обработке и электроплазменному полированию в среде химически нейтрального электролита. Полированием удаляли дефектный поверхностный слой на глубину 5–10 мкм с обеспечением шероховатости Ra 0,15–0,06 мкм. Затем на обезжиренную поверхность наносили многослойное вакуумное ионно-плазменное нитридное покрытие. Таким образом, достигалось минимальное влияние подложки на формируемый уровень остаточных напряжений в покрытиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований был выбран широко применяемый в двигателестроении титановый сплав ВТ6 (Ti – основа, Al – 6 %; V – 4 %) с температурой полиморфного превращения 975 ± 5 °С. Исходные заготовки диаметром 20 мм и длиной 100 мм подвергались термической обработке по ранее отработанной технологии, которая включала предварительную закалку с нагревом до 950 °С (нагрев 20 мин) и последующий

отжиг при 675 °С в течение 4 ч в контролируемой среде. Последующая обработка заготовок включала в себя операции: фрезерование, механическое полирование с шероховатостью Ra 0,8 и окончательная термообработка для снятия остаточных напряжений при температуре 500 °С, выдержка в печи 2 ч. Перед упрочнением образцы прошли ультразвуковую мойку в 10 %-щелочном растворе и обезжиривание в органическом растворителе типа «Нефрас». Вакуумно-плазменная обработка включала в себя ионную очистку ионами аргона, ионную имплантацию (легирование поверхности) ионами азота и осаждение многослойных покрытий Ti-TiN и Ti-TiVN. Схема обработки приведена на рис. 1.

Ионно-плазменная модификация поверхности образцов и нанесение покрытий с ионным ассистированием проводилась при следующих режимах:

- ток накала плазмогенератора «ПИНК» от 120 до 150 А;
- ток дугового разряда «ПИНК» от 30 до 120 А;
- давление газа Ar, N₂ до $5 \cdot 10^{-1}$ Па;
- напряжение смещения на образцах от 50 до 1500 В;
- ток дуги на испарителях .. от 120 до 150 А;
- температура образцов не более 450 °С.

Структуру и толщину покрытий определяли методами металлографического анализа на оптическом микроскопе Nikon Eclipse MA100 с увеличением 200-5000× с изготовлением сферических шлифов Ø20 мм на установке CSM Calotest по методике [11, 12].

Измерение микротвердости проводили по ГОСТ 9450-76 [13] алмазным наконечником Виккерса на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 100 г и времени выдержки 15 с.

Объемную долю пор и неметаллических включений определяли при помощи точечного метода (метод А. А. Глаголева [14]) по фотографиям шлифа после полирования. Точечный метод основан на подсчете числа узловых точек, попавших на пору (металлическое включение) при наложении квадратной сетки. Величина пористости определяется как отношение количества подсчитанных точек к их общему количеству в сетке.

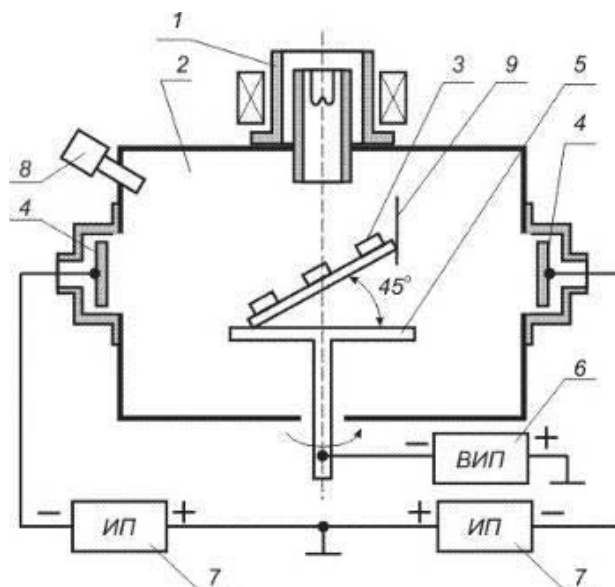


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – плазмогенератор «ПИНК»; 2 – вакуумная камера; 3 – оснастка с плоскими образцами; 4 – электродуговые испарители с катодами из титана и ванадия; 5 – поворотный стол; 6 – высоковольтный источник питания; 7 – источники питания электродуговых испарителей; 8 – фотопирометр; 9 – экран

Прочность покрытий и контактный модуль упругости определяли методом индентирования (Scratch test [15]) на установке CSM Microscratch tester. Параметры индентирования:

- наконечник типа Роквелл с диаметром при вершине 20 мкм;
- интенсивность прилагаемой нагрузки – от 0,03 до 10 Н/мин;
- скорость индентирования – 2 мм/мин.

Для определения в исследуемых покрытиях внутренних (остаточных) напряжений был проведен рентгеноструктурный анализ по методике « $\sin^2\psi$ » (метод многократных наклонных съемок) [16, 17] с использованием рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV. Основными параметрами при расчете остаточных напряжений по этому методу являются модуль Юнга и коэффициент Пуассона, определяемые экспериментально.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Визуально нанесенные покрытия представляют собой плотную равномерную пленку темно-желтого (Ti-TiN) и серо-желтого (Ti-TiVN) цветов с равномерно расположенными засветлениями округлой формы диа-

метром до 0,1 мм. Такие засветления возникают вследствие электродугового испарения катода титана и являются технологической особенностью PVD метода нанесения покрытия. Отслоений, растрескивания, несплошностей и прочих дефектов по поверхности образцов не наблюдалось, что свидетельствует о достаточно высокой адгезионной прочности сцепления исследуемых покрытий и титановой подложки.

В поперечном разрезе покрытия представляют собой многослойные композиции с чередованием сравнительно тонких прослоек титана и основных нитридных слоев (рис. 2). В структуре покрытия наблюдаются единичные поры диаметром до 0,05 мм, прочих внутренних дефектов в покрытии не обнаружено. Пористость покрытий не превышает 1 %.

Общая толщина покрытий составила от 6 до 10 мкм, точные значения толщин покрытий и составляющих их слоев приведены в табл. 1.

Исследования внутренних напряжений проводили методом многократных наклонных съемок при режимах: излучение – $\text{Cu-K}\alpha$; напряжение – 40 кВ; ток – 40 мА; угол съемки – 142° . Результаты расчета напряжений приведены в табл. 1.

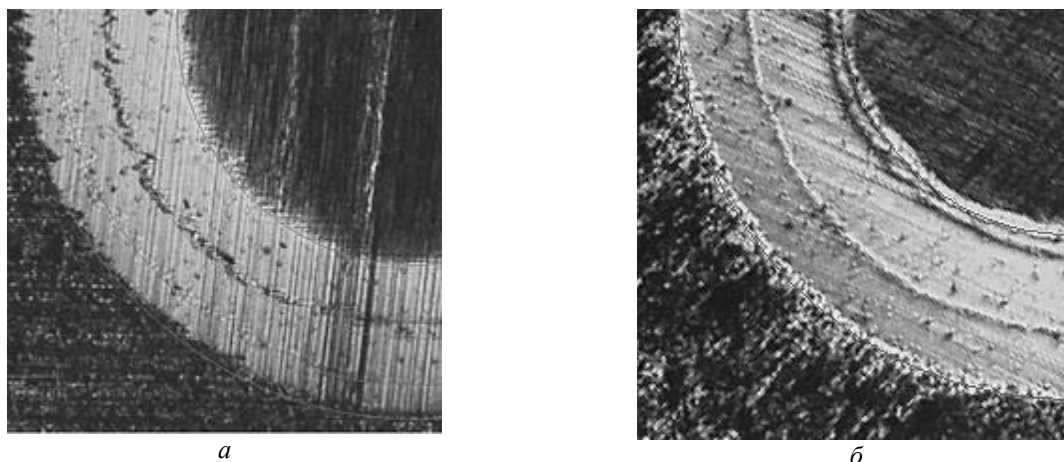


Рис. 2. Структура исследуемых многослойных покрытий (сферический шлиф):
а – Ti-TiN; б – Ti-TiVN

Таблица 1

Параметры исследуемых покрытий

Наименование параметра	Значение параметра		
	Ti-TiN	Ti-TiVN	BT6*
Материал	Ti-TiN	Ti-TiVN	BT6*
Общая толщина покрытия, мкм	5 ⁺³	5 ⁺³	–
Количество слоев	4	4	–
Толщина промежуточных титановых слоев, мкм	0,5	0,5	–
Толщина основных нитридных слоев, мкм	2,5	2,5	–
Температура осаждения, °С	385..410	410..420	–
Шероховатость Ra, мкм	0,87	0,35	0,18
Микротвердость HV _{0,1}	2 200	1 800	367
Пористость (метод А. А. Глаголева)	менее 1%	менее 1%	–
Критическая нагрузка индентирования Lc, Н	5,4	2,6	–
Прочность покрытия при индентировании σ _{III} , МПа	5 689	5 258	–
Контактный модуль упругости Eс, МПа	3,0·10 ⁵	2,6·10 ⁵	–
Остаточные напряжения (метод «sin ² ψ»), МПа	-1259±19	-789±37	-203±9

Примечание: * – для сравнения приведены свойства материала образцов, прошедших полный цикл технологической подготовки к нанесению покрытия, включая термическую обработку и электролитно-плазменное полирование

Определение прочности и механических свойств образцов с покрытиями проводили методом Scratch-test. На образцах с покрытиями алмазным индентором были нанесены царапины при непрерывно увеличивающейся нагрузке от 0,3 до 30 Н. Характер разрушения покрытий исследовали визуально с помощью оптического микроскопа при увеличении от 200 до 500×. Фотографии покрытий с нанесенными царапинами показаны на рис. 3.

Анализ полученных данных показывает, что характер разрушения покрытий хрупкий с образованием микротрещин и локальных участков скола. За критическую нагрузку адгезионного разрушения (Lc) принимали нагрузку, при которой наблюдали отслоение покрытия от подложки или полное разрушение покрытия.

В ходе эксперимента были установлены зависимости глубины индетирования от прикладываемой нагрузки, величины упругопластической и пластической (остаточной) деформации (рис. 4). По экспериментальным данным и условиям контакта жесткого шара и упругого полупространства (задача Герца) были рассчитаны эквивалентные напряжения по критерию Треска–Сен-Венана [18]:

$$\sigma_{III} = |\sigma_1 - \sigma_3| = 2 \frac{1 - 2p_0}{3}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где $p_0 = \frac{3L}{2\pi Rh}$, МПа – максимальное давление в контакте между индентором и образцом; L, Н – действующая нагрузка на индентор; R, мм радиус индентора; h, мм – глубина индетирования.

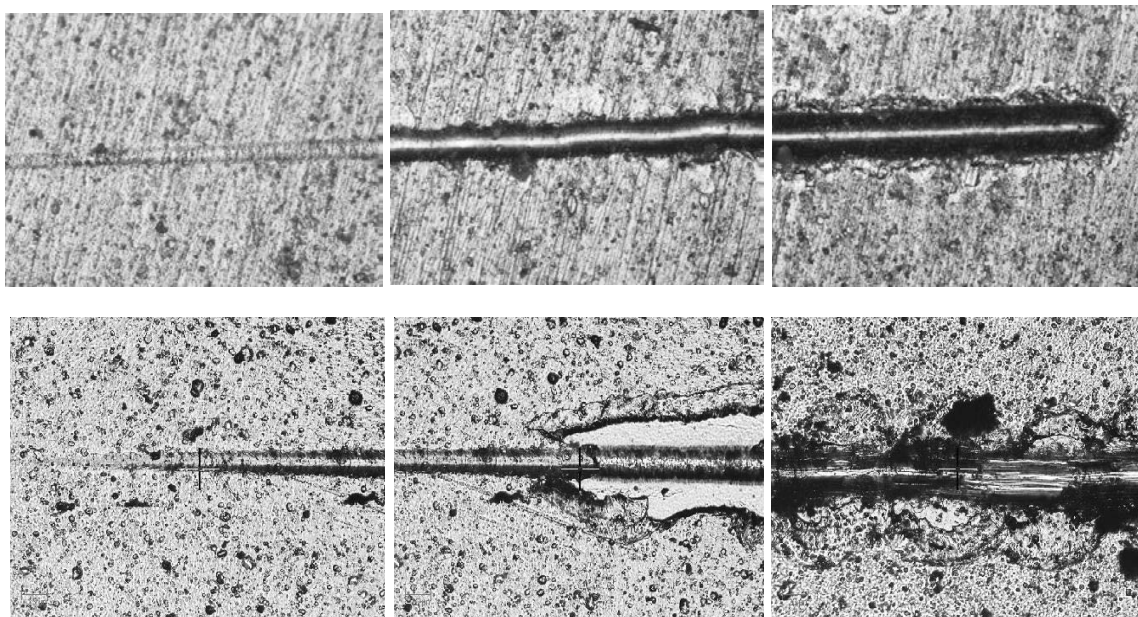


Рис. 3. Царапина и место скола покрытия при достижении критической нагрузки L_c :
а – на образце «Ti-TiN», *б* – на образце «Ti-TiVN»

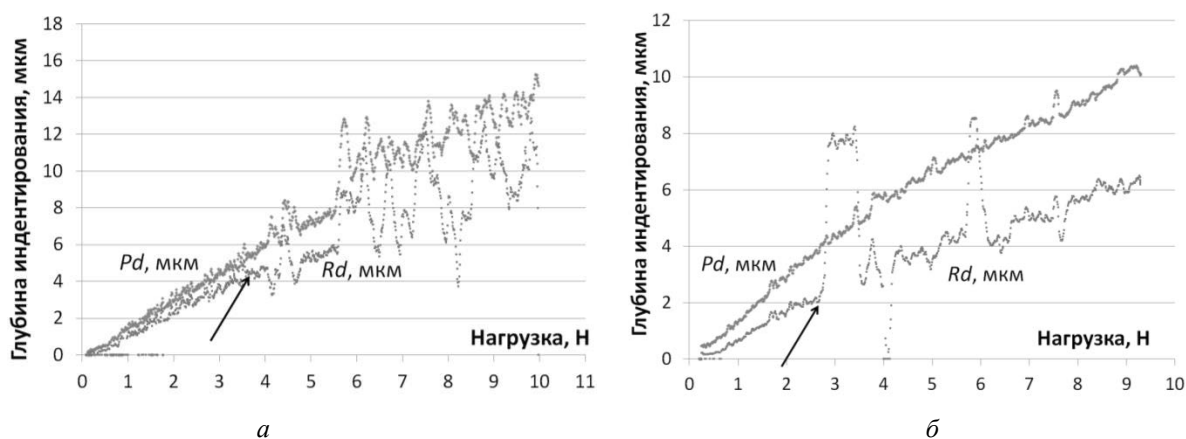


Рис. 4. Зависимость глубины индентирования от прилагаемой нагрузки образцов с покрытиями:
а – «Ti-TiN» и *б* – «Ti-TiVN». Pd – глубина упруго-пластической деформации; Rd – глубина пластической (остаточной) деформации. Стрелками указаны места скола покрытия при достижении критической нагрузки L_c

Графики зависимости эквивалентных напряжений от прилагаемой нагрузки показаны на рис. 5. По полученным зависимостям определяли характеристики покрытий:

– прочность покрытия – максимальное эквивалентное напряжение, при котором начинает возникать сетка микротрещин, приводящая к дальнейшему хрупкому разрушению, сколу покрытия;

– контактный модуль упругости, соответствующий максимальной величине эквивалентных напряжений и рассчитываемый по известным формулам механики контактного взаимодействия [18]:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_{ind}^2}{E_{ind}} + \frac{1 - \nu^2}{E}, \quad (2)$$

$$E^* = \frac{\pi p_0}{2} \sqrt{\frac{R}{h}}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где ν , ν_{ind} – коэффициенты Пуассона покрытия и индентора соответственно; E^* – эквивалентный модуль упругости контактирующих тел, МПа; $E_{ind} = 11,45 \cdot 10^5$ МПа – Модуль Юнга алмазного индентора.

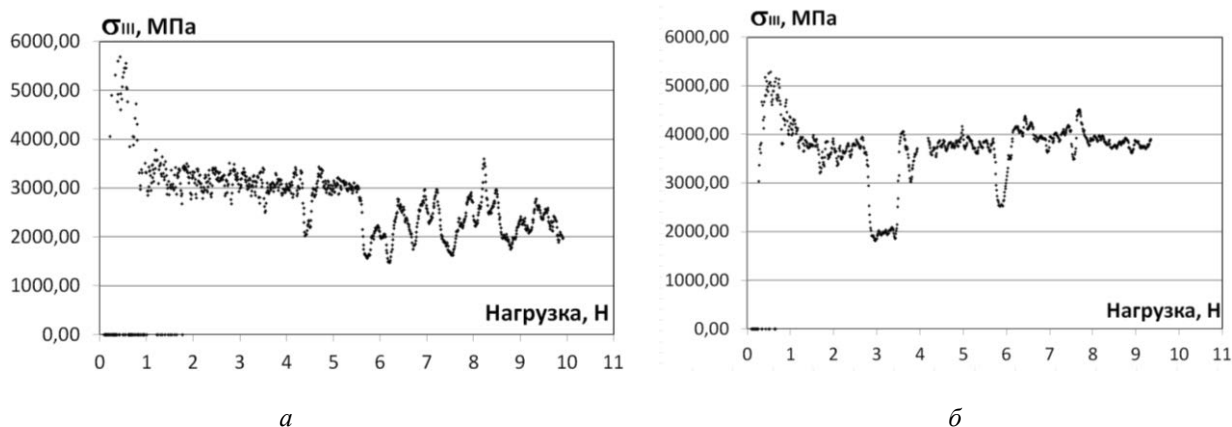


Рис. 5. Зависимость величины эквивалентных напряжений по критерию Треска–Сен-Венана от нагрузки при индентировании образцов с покрытиями: а – «Ti-TiN»; б – «Ti-TiVN»

Полученные характеристики исследуемых покрытий приведены в табл. 1. Сравнивая исследуемые покрытия, можно отметить, что наиболее прочным является покрытие Ti-TiN как по критерию микротвердости, так и по величине эквивалентных напряжений. Кроме того, он характеризуется сравнительно большей величиной остаточных напряжений (-1259 МПа). Легирование этого покрытия ванадием заметно уменьшает его внутренние напряжения (на 37 %) при незначительном снижении прочности, что можно объяснить меньшим значением модуля упругости и, возможно, коэффициентом температурного расширения.

При описании влияния защитных (высокотвердых) покрытий на механические свойства металлов исследователи отмечают несколько явлений, одним из которых является так называемый «барьерный эффект» [19], наблюдаемый на границе «покрытие-подложка». Барьерный эффект объясняет механизм блокирования покрытием выхода дислокаций на поверхность образца вследствие одновременного протекания таких процессов, как упругое взаимодействие между дислокациями в материале подложки при их перемещении в направлении покрытия; подавление покрытием работы поверхностных дислокационных источников и др.

Важным фактором в формировании «барьерного эффекта» является создание остаточных напряжений сжатия на границе «матрица-покрытие», о чем свидетельствуют данные РСА, полученные в настоящей работе (табл. 1). Упрочнение поверхности путем нанесения покрытия с высоким уровнем

сжимающих напряжений снижает темпы самоорганизации структур в приповерхностных слоях, и, как результат, преодоление сформированного барьерного слоя будет осуществляться при более высоком напряжении. При этом необходимо отметить, что кроме наличия самого барьерного слоя в виде покрытия, на плотность и подвижность дислокаций оказывают влияние такие факторы, как структура осажденного материала, его толщина, адгезия с материалом подложки, различие модулей упругости, уровень остаточных напряжений и др.

Нанесение барьерных слоев в виде тонких пленок с высокими механическими свойствами обеспечивает значительное повышение уровня сжимающих напряжений и является эффективным препятствием генерации и движению дислокаций. Предложенный комплексный подход к упрочнению материала позволит также увеличить надежность и долговечность работы деталей в условиях знакопеременных нагрузок и деформаций, повысить усталостную прочность. Об этом свидетельствуют ранее проведенные экспериментальные исследования, например, в работе [20] показано существенное повышение усталостной прочности стали JIS S35C с тонким покрытием TiN (2–6 мкм), осажденным на поверхность образцов вакуумно-плазменным методом. Тонкий слой TiN толщиной 3 мкм, на поверхности стали AISI 1045 повышает его предел выносливости на 40 МПа [21].

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о принципиальной возможности повышения прочностных свойств сплава Ti-6Al-4V (при температурах до 500 °C)

путем нанесения высокотвердых многослойных ионно-плазменных покрытий систем Ti-TiN и Ti-TiVN. Вместе с этим предложенный подход к описанию формируемых свойств требует более детального изучения усталостных свойств, сопротивления ползучести и поверхностному износу, на что будут направлены наши усилия в дальнейшем.

Исследуемый комплексный подход упрочнения сплава Ti-6Al-4V является перспективным для изготовления ответственных изделий ГТД, например, рабочих лопаток компрессора, к которым предъявляются повышенные требования к сопротивлению усталости и эрозионному и коррозионному воздействиям.

ВЫВОДЫ

1. По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что остаточные напряжения исследуемых покрытий являются сжимающими, повышающими уровень механических свойств и сопротивление зарождению трещин при пластической деформации.

2. Легирование ванадием нитридных покрытий системы Ti-TiVN значительно (на 37%) снижает уровень внутренних (остаточных) напряжений без уменьшения адгезионной прочности, что может быть связано с проявлением «барьерного эффекта» в приповерхностных слоях металла.

3. Полученные результаты демонстрируют перспективы комплексного упрочнения сплава ВТ6, включающего термическую обработку, электролитно-плазменное полирование и последующее нанесение ионно-плазменных покрытий для повышения эксплуатационных характеристик изделий ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guseva M. I., Martynenko Yu. V., Smyslov A. M. Deep modification of materials under implantation-plasma treatment. Experiment and theory // In proc. 3-rd Inter Workshop on Plasma-Based Ion Implantation. Rossendorf, Germany. September, 1996. Pp. 101-106.
2. Wilbur P. J., Buchholtz B. W. Engineering tribological surfaces by ion implantation // Surf. Coat. Tech. 1996. Vol. 79. Pp. 1-8.
3. Budzynski P., Youssef A. A., Sielanko J. Surface modification of Ti-6Al-4V alloy by nitrogen ion implantation // Wear. 2006. Vol. 261, No. 11-12. Pp. 1271-1276.
4. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods

/ A. Zhecheva, et. al. // Surface & Coatings Technology. 2005. Vol. 200. Pp. 2192-2207.

5. Study of properties of nanolayered erosion-resistant coatings on the basis of carbides and nitrides of metals / S. A. Muboyadzhyan, et. al. // Metals. 2011. No. 4. Pp. 91-101.

6. MJR Improving corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy through plasma-assisted PVD deposited nitride coatings / V. M. C. A. Oliveira, et. al. // Corros Sci. No. 88. Pp. 317-327.]

7. Processing of an ultrafine-grained titanium by high-pressure torsion: an evaluation of the wear properties with and without a TiN coating / C. T. Wang, et. al. // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 2013. No. 17. Pp. 166-175.

8. Indentation and scratch testing of DLC-Zr coatings on ultrafine-grained titanium processed by high-pressure torsion / C. T. Wang, et. al. // Wear. 2013. No. 306. Pp. 304-310.

9. Tribology testing of ultrafine-grained Ti processed by high-pressure torsion with subsequent coating / C. T. Wang, et. al. // J. Mater Sci. 2013. No. 47. Pp. 4742-4748. doi:10.1007/s10853-012-7110-y14-16.

10. Microstructural Analysis of Ti-6Al-4V Alloy after Plasma Immersion Ion Implantation / M. Castagnet, et. al. // Materials Science Forum. 2012. Vol. 727-728. Pp. 50-55.

11. ISO 26423:2009 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – determination of coating thickness by crater-grinding method. 20 p.

12. ISO 1071-2 Methods of test for ceramic coatings – determination of coating thickness by the crater-grinding method.

13. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Издательство стандартов, 1993. 33 с. [*Microhardness measurement by indentation of diamond tips*, (in Russian), Federal standard 9450-76, Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1993.]

14. Салтыков С. А. Стереометрическая литография. М.: Металлургия, 1970. 375 с. [S. A. Saltykov, *Stereometric lithography*, (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1970.]

15. ASTM Standard C1624 (05) – Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch testing.

16. Технологические остаточные напряжения. Под ред. А. В. Подзее. М.: Машиностроение, 1973. 216 с. [A. V. Podzeya, *Technological residual stresses*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1973.]

17. МР 103-83. Методические рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций. Определение макронапряжений рентгеновским методом. М.: ВНИИМАШ, 1983. 63 с. [МР 103-83. Guidelines. Calculations and strength tests. Experimental methods for determining the stress-strain state of machine elements and structures. X-ray determination of macron yarn, (in Russian). Moscow: VNIIMASH, 1983.]

18. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с. [K. Johnson, *Mechanics of contact interaction: translation from English*. Moscow: Mir, 1989.]

19. Панин В. Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2, № 6. С. 5-23. [V. E. Panin, "Physical mesomechanics of the surface layers of solids", (in Russian), in *Fizicheskaya mezomekhanika*, vol. 2, no. 6, pp. 5-23, 1999.]

20. **Shiozawa K., Nishino S., Handa K.** The Influence of Applied Stress Ratio on Fatigue Strength of TiN – coated Carbon Steel // *JSME Inter. J.* 1992. Vol. 35, No. 3. Pp.347-353.

21. **Influence** of single - and multilayer TiN films on the axial tension and fatigue performance of AISI 1045 steel / Y. L. Su, et. al. // *Thin Solid Films.* 1999. No. 338. Pp.174-184.

ОБ АВТОРАХ

СМЫСЛОВ Анатолий Михайлович, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двигателям лет. аппаратов (УГАТУ, 1993), Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

ДЫБЛЕНКО Юрий Михайлович, нач. отдела СКТБ «Искра». Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1974). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. разработки вакуумноплазменных технологий высоких энергий и специальных устройств для обеспечения эксплуатационных свойств деталей, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

СЕЛИВАНОВ Константин Сергеевич, доц., ст. науч. сотр. НИЧ каф. технологии машиностроения. Дипл. инж. по специальности «Технология машиностроения» (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. физ.-хим., структурно-фазового состояния и эксплуатационных свойств поверхности детали после ее ионно-имплантационного, вакуумно-плазменного модифицирования.

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич, Академик АН РБ, проф., зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Заслуж. деят. науки и техники РФ. Иссл. в обл. механики деформир. тверд. тела.

ДУБИН Алексей Иванович, ст. преп. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по динамике и прочности машин (СГАУ, 2015). Иссл. в обл. сопротивл. усталости, релакс. стойкости и остат. поверхн. напряжений.

METADATA

Title: Mechanical properties and internal stress level of Ti-TiN and Ti-TiVN multilayer Arc-PVD coatings for parts made of titanium alloys.

Authors: A. M. Smyslov¹, Y. M. Dyblenko², K. S. Selivanov³, V. S. Zhernakov⁴, A. I. Dubin⁵

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹smyslovam@yandex.ru, ²tm@usatu.ru,

³k.selivanov@mail.ru, ⁴sm.ugatu@mail.ru,

⁵alexey.dubin@rambler.ru

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 42-49, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article discusses the enhancement of the operational properties of Ti-6Al-4V alloy by complex hardening, including electrolyte-plasma polishing, ion implantation of N⁺ and deposition of ion-plasma nitride coatings Ti-TiN and Ti-TiVN by Arc-PVD technique. The mechanical properties

of the coatings were studied by the Scratch-test method, the adhesive strength was evaluated, and the values of residual (internal) stresses were established.

Key words: Arc-PVD coating; titanium alloy hardening; residual stresses; adhesive strength.

About authors:

SMYSLOV, Anatoliy Mikhaylovich, Prof., Dept. of Mechanical Engineering Technology. Dipl. engineer-technol. (UAI, 1973). Dr. of Tech. Sci. in heat engines of aircraft (UGATU, 1993). Investigation in area of ion-implantation and vacuum-plasma surface modification.

DYBLENKO, Yuri Mikhailovich, Head of the Department, SKTB Iskra. Dipl. mechanical engineer (USATU, 1974). Candidate of Technical Science in Engineering Technology (USATU, 2002). Research in the region development of high-energy vacuum-plasma technologies and special devices to ensure the operational properties of parts operated in extreme conditions.

SELIVANOV, Konstantin Sergeevich, Docent (Assoc. Prof.), Mechanical Engineering Dept. Bachelor and Dipl. Engineer in Mechanical Engineering (UGATU, 1997). Candidate of Science (PhD) Tech. Science in Mechanical Engineering (USATU, 2000). Research in physic-chemistry, structural-phase state and operational properties of the metal surface after ion implantation and vacuum plasma modification.

ZHERNAKOV, Vladimir Sergeevich, Academician of the ASRB, Prof., Head of a Chair of Dept. of Strength of Materials, Dipl. Engineer (Ufa Aviation Institute, 1967). Dr. of Tech. Sci. (Ufa State Aviation Technical, 1992). Honored Science Worker of RF. Member-correspondent of Science Academy of Bashkortostan Republic. Researches in area of deformable body mechanics.

DUBIN, Aleksey Ivanovich, Senior Lect., Dept. of Mechanical Engineering Technology. Dipl. engineer-technol. (UGATU, 2000). Cand. of Tech. Sci. in dynamics and strength of machines (SGAU, 2015). Investigation of fatigue strength, relaxational resistance and surface residual stresses.