

С.А. Атрошенко^{1,3}, Н.А. Казаринов¹, Р.З. Валиев², Р.Р. Валиев², Я.Н.Савина²,
М.Н. Антонова¹, Ю.В. Петров¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,

²Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия,

³ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия,

satroshe@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЙ TiN И ZrN НА СТОЙКОСТЬ СПЛАВА ВТ6 В РАЗНОМ СТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ К ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭРОЗИИ

Аннотация

Работа посвящена экспериментальному изучению влияния покрытий TiN и ZrN на сплаве ВТ6 в исходном крупнозернистом (КЗ) состоянии и после равноканального углового прессования (РКУП) с получением ультрамелкозернистой структуры (УМЗ) на стойкость к динамической эрозии твердыми частицами корунда средним размером 109, 58 и 23 мкм в воздушном потоке со скоростями 50 до 250 м/с и временем экспозиции от 30 с до 10 мин. В результате экспериментов определялся эрозионный износ, на поверхности эрозии замерялась доля вязкого разрушения на эрозионной поверхности, глубина разрушенного слоя и изменение микротвердости от эрозионной поверхности с покрытием и без него, а также весовой износ и шероховатость поверхности. Проведен анализ структуры приповерхностного слоя вблизи покрытия.

Ключевые слова: титановый сплав ВТ6, крупнозернистое и ультрамелкозернистое состояния, покрытия TiN и ZrN, динамическая эрозия, эрозионное разрушение и износ.

Введение

Детали газотурбинного двигателя (ГТД) эксплуатируются в условиях высоких статических, динамических и циклических нагрузок, агрессивных сред и повышенных температур. Поэтому к таким деталям предъявляют особые требования – высокая прочность и жесткость, усталостная выносливость, высокая эрозионная стойкость и т.д. [1-2]. В авиадвигателестроении для изготовления ответственных деталей ГТД применяются конструкционные двухфазные титановые сплавы, имеющие небольшой вес и обладающие высокими механическими и коррозионными свойствами. Одной из наиболее опасных проблем, возникающих в процессе эксплуатации газотурбинного двигателя (ГТД), является поломка лопаток турбины, поврежденных высокоскоростными ударами посторонних предметов. Деформация и разрушение лопаток могут привести к разбалансировке всей конструкции ГТД с последующим выходом двигателя из строя. Эрозию лопатки турбины следует рассматривать как процесс динамического разрушения, поскольку он включает в себя высокоскоростные удары частиц с очень короткой продолжительностью и с углом атаки в диапазоне от 0° до 90° [3-5]. В настоящее время наиболее эффективным подходом к повышению эксплуатационной надежности ГТД является применение защитных покрытий из нитридов и карбидов соединений титана,

циркония, хрома и алюминия [6-11]. Для защиты лопаток от эрозионного износа используются многослойные покрытия системы ZrN/Zr, состоящие из чередующихся мягких и твердых слоев и сочетающие в себе высокую износостойкость и твердость [12-13]. Влияние на эрозионный износ поверхности оказывает не только тип и архитектура покрытия, но и физико-механические характеристики основного материала изделий, так как вместе с покрытием они образуют сложную систему, которая взаимодействует между собой в процессе эксплуатации. Поэтому одновременно с защитой поверхности эрозионностойкими покрытиями необходимо повышать прочностные характеристики основного материала. Последнее десятилетие особый интерес представляют ультрамелкозернистые (УМЗ) титановые сплавы, полученные методами интенсивной пластической деформации [14-15], благодаря своим повышенным физико-механическим свойствам [16-17]. Исследования показывают, что формирование УМЗ структуры в объеме материала с размером зерен/субзерен в пределах 100-500 нм в титановых сплавах приводит к увеличению прочности, сопротивлению усталости, что позволяет повысить эксплуатационные характеристики деталей, изготовленных из них.

Методы и материалы

Объектом исследования в настоящей работе является двухфазный титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V), широко используемый в авиадвигателестроении для изготовления ответственных деталей, в частности лопаток 1-3 ступеней компрессора низкого давления ГТД. В сплаве ВТ6 была сформирована ультрамелкозернистая структура методом равноканального углового прессования по ранее разработанному режиму. Заготовки диаметром 20 мм и длиной 100 мм подвергали предварительной термообработке по режиму: закалка при $T = 960\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа с последующим отпуском при $T = 675\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 4 часов; затем деформировали на оснастке с углом пересечения каналов 120° , по маршруту Вс при температуре $T=650^{\circ}\text{C}$ в 4 прохода. После этого на поверхность образцов было нанесено покрытие TiN и ZrN.

Исследование поверхностей эрозионного разрушения образцов титанового сплава ВТ6 после разных видов обработки и эрозии осуществлялось на оптическом микроскопе Axio-ObserverZ1-M в темном поле и в контрасте C_DIC. Определялась площадь вязкой составляющей на поверхности разрушения по фотографии с помощью программы AxioVision. Структуру поперечного сечения испытанных образцов исследовали на том же микроскопе после соответствующего травления в светлом поле, поляризованном свете и контрасте C_DIC. Микротвердость определялась на микротвердомере SHIMADZU серии HVM-G (по методу Виккерса) при нагрузке 100 г. В работе было проведено измерение величины зерна и количества α -фазы. С помощью линейного анализа определяли удельную поверхность раздела фаз: $S_{AB} = 2Z^{AB}/L$, где L – общая длина измерительной линии; Z^{AB} – количество точек пересечения измерительной линии с границами фаз А и В. В качестве фаз А и В принимаются фазы α и β .

На поверхность образцов с исходной крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой вакуумно-дуговым методом было осаждено покрытие TiN и ZrN (Рис. 1), которое является популярным для титановых сплавов. Архитектура покрытия представляет собой 3 функциональных слоя TiN и ZrN и 3 подслоя Ti (Рис. 1b).

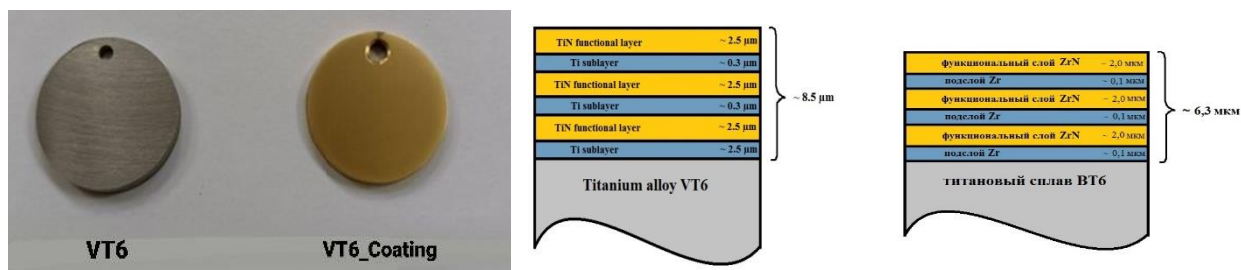


Рисунок 1 - а) Фотография образцов без покрытия и с покрытием TiN и ZrN; б) архитектура покрытия TiN и ZrN

Для эрозионных испытаний в равных условиях образцы титанового сплава ВТ6 в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состоянии с покрытием TiN и ZrN и без покрытия были изготовлены в виде полукруга диаметром 15 mm и установлены в одну державку (рис.2в) так, чтобы они подвергались воздействию одного и того же потока частиц, тем самым нивелируя возможную разницу в определении скорости частиц твердой фракции в потоке и их размеров. Схема установки приведена на рис.2. В представленном исследовании титановый сплав испытывался в потоке частиц воздуха.

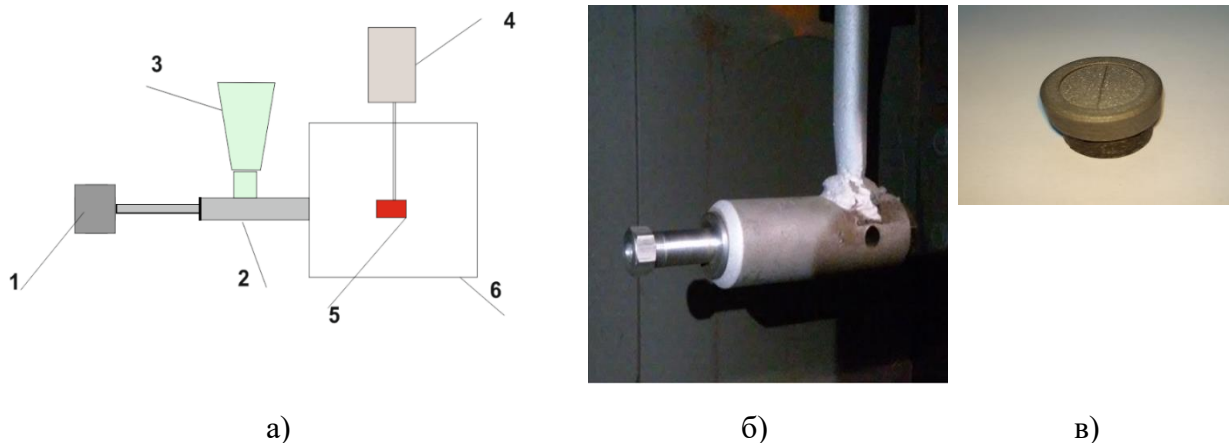


Рисунок 2 – а) Схема эрозионной установки аэродинамического типа. 1 - компрессорная камера; 2 - разгонный участок; 3 - дозатор твердой фазы; 4 - пневматический привод для ввода образца; 5 - образец; 6 - рабочая камера. б) Конструкция крепления образцов в газоабразивном потоке.

Сплав ВТ6 с покрытием TiN испытывался при эрозии частицами корунда 109 μm со скоростью 150 m/s и разной экспозицией, а для образцов ВТ6 с покрытием ZrN были проведены три серии экспериментов с корундовыми абразивными порошками трех средних размеров частиц 23, 58 и 109 мкм. Исследовались скорости потока воздуха – 50, 100, 150, 200 и 250 м/с, при этом скорость частиц варьировались от 42 м/с до 174 м/с в зависимости от среднего размера порошка.

Результаты и обсуждение

1. Исследование сплава ВТ6 с покрытием TiN

В исходном состоянии (до эрозии) сплав ВТ6 имеет смешанную глобулярно-пластинчатую структуру, с зернами первичной α-фазы, а также с пластинчатой (α+β) областью.

В работе проведено исследование микроструктуры после эрозии сплава ВТ6 с покрытием TiN в различных структурных состояниях. Из фотографий

микроструктур (рис.3) видно, что даже при самой малой экспозиции слой покрытия после эрозии полностью изнашивается.

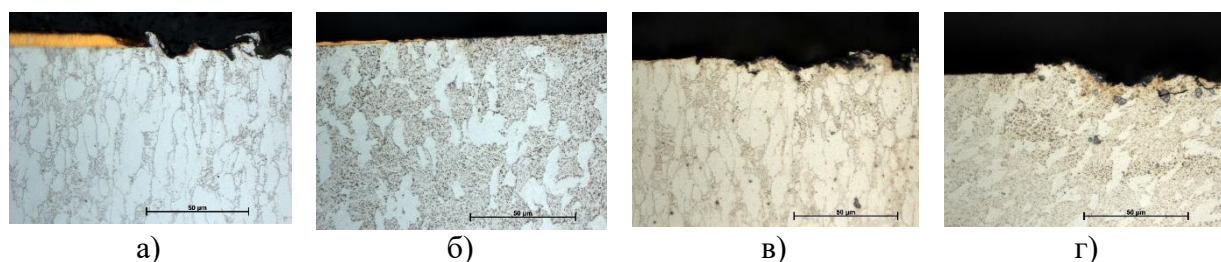


Рисунок 3 – Структура: а - сплава ВТ6 с покрытием TiN, б - ВТ6_РКУП с покрытием TiN, в - сплава ВТ6 и г - ВТ6_РКУП после эрозионного воздействия с временем экспозиции 30 с при эрозии частицами корунда 109 μm со скоростью 150 m/s x1000.

Данные по вязкой составляющей на поверхности эрозионного разрушения показывают, что в зависимости от времени экспозиции количество вязкой составляющей на поверхности эрозии меняется с экстремумом – с минимумом при 180 с для сплава ВТ6 и ВТ6_РКУП и с максимумом – с покрытием TiN как на сплаве ВТ6, так и на сплаве ВТ6_РКУП.

Также была замерена глубина эрозионного разрушения. После эрозии слой покрытия был полностью унесен даже после минимальной экспозиции. Наибольшая глубина разрушения у сплава ВТ6_РКУП, меньше - у сплава ВТ6 без обработки, еще меньше у образца ВТ6 с покрытием и самая маленькая – у образца ВТ6_РКУП с покрытием. С ростом выдержки глубина разрушения пропорционально увеличивается при всех режимах эрозии, причем при самой малой выдержке 30 с покрытие разрушилось, а металл остался практически без разрушения, то есть влияние РКУП на упрочнение материала явно выражено. В таблице 1 приведены данные по размеру и количеству α-фазы для сплава ВТ6 и ВТ6 с покрытием TiN. Видно, что минимальное зерно у образца ВТ6_РКУП, а максимальное – у сплава ВТ6.

Таблица 1 - Размер зерна α-фазы и ее количество в сплаве ВТ6

Состояние	$d_\alpha, \mu\text{m}$	$S_{AB}, \text{m}^{-1} \cdot 10^6$
ВТ6	10,7	$0,42 \cdot 10^6$
ВТ6_РКУП	6,8	$0,32 \cdot 10^6$
ВТ6_покрытие TiN	7,7	$0,34 \cdot 10^6$
ВТ6_РКУП_покрытие TiN	9,2	$0,64 \cdot 10^6$

где d_α – размер зерна α – фазы, S_{AB} удельная поверхность раздела фаз α и β (количество α – фазы)

Проведено измерение микротвердости от поверхности образцов сплава ВТ6 после различных обработок в исходном состоянии (до эрозии), а также проанализировано изменение микротвердости от поверхности эрозионного разрушения к центру образца. Максимальная по величине твердость у образца ВТ6_РКУП_покрытие TiN, как в исходном состоянии, так и при всех экспозициях, кроме 60 с, причем она максимальная у эрозионной поверхности, а на расстоянии 50 μm от поверхности она, как правило, значительно ниже. Высокая микротвердость связана с наклепом поверхности абразивными частицами, а также упрочнением металла при РКУП обработке и влиянием покрытия – у покрытия образец ВТ6_покрытие TiN имеет самую высокую твердость в исходном состоянии, которая при удалении от покрытия резко снижается и становится самой низкой из всех состояний. Самая высокая твердость коррелирует с размером разрушенной зоны -

она минимальная у того же образца ВТ6_РКУП_покрытие TiN. При экспозиции же 60 с максимальная микротвердость у образца ВТ6_РКУП, что связано с упрочнением при РКУП и малым влиянием эрозии на поверхность образца. Измеренный весовой износ оказался максимальным у образцов с покрытием TiN, как у сплава ВТ6, так и в УМЗ состоянии, это, вероятно, связано с очень быстрым износом покрытия и дальнейшим разрушением основного металла.

2. Исследование сплава ВТ6 с покрытием ZrN

В работе проведено исследование микроструктуры после эрозии сплава ВТ6 в различных структурных состояниях. Из фотографий микроструктур (рис.4) после эрозии частицами 109 μm видно, что при самой малой экспозиции 30 секунд и минимальной скорости 50м/с слой покрытия после эрозии сохранился, но наблюдаются поперечные трещинки в покрытии.

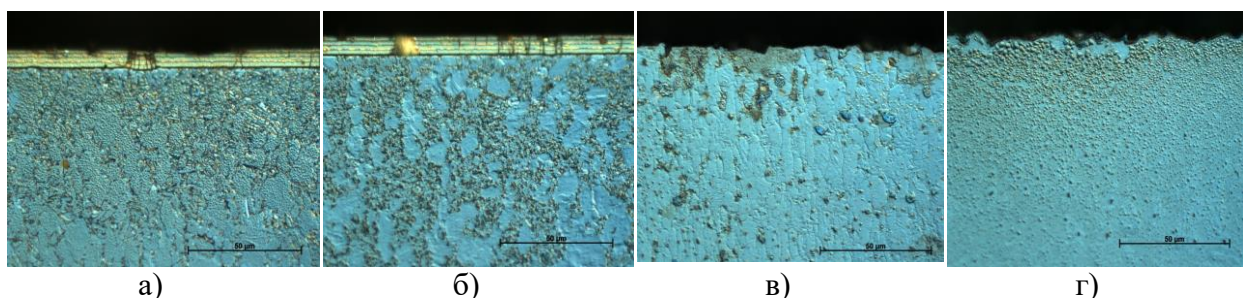


Рисунок 4 - Структура сплава ВТ6 с покрытием: а - ВТ6_ ZrN, б - ВТ6_РКУП_ ZrN, и без покрытия: в - ВТ6, г - ВТ6_РКУП после эрозии частицами 109 μm со временем экспозиции 30 с со скоростью 50 m/s x1000 C_DIC.

Микроструктура после эрозии частицами 23 μm представлена на рисунке 5.

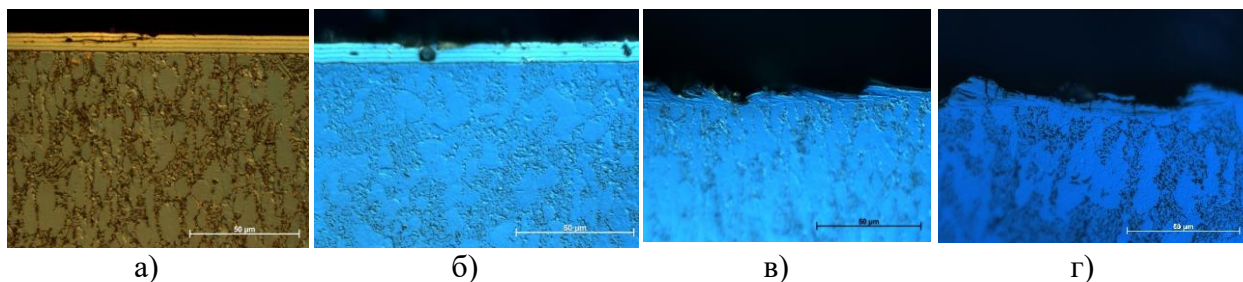


Рисунок 5 - Структура сплава ВТ6 с покрытием ZrN: ВТ6_ ZrN (а), ВТ6_РКУП_ ZrN (б), и без покрытия: ВТ6 (в), ВТ6_РКУП (г) после эрозии частицами 23 μm со временем экспозиции 5 минут со скоростью 50 m/s x1000 C_DIC

Видно, что при экспозиции 5 минут и минимальной скорости 50м/с слой покрытия после эрозии сохранился, лишь наблюдается расслоение покрытия на отдельных участках.

Также была замерена глубина эрозионного разрушения (линейный износ). При эрозии крупным порошком 109 μm наибольшая глубина разрушения у сплава ВТ6, меньше - у сплава ВТ6_РКУП, самая маленькая и примерно одинаковая у образцов ВТ6 с покрытием. С ростом скорости глубина разрушения пропорционально увеличивается при всех режимах эрозии. При эрозии мелким порошком 23 μm покрытие на сплаве ВТ6 остается без разрушения при всех скоростях, на материале ВТ6_РКУП разрушение начинается со 100м/с, на материалах без покрытия разрушение возрастает пропорционально с ростом скорости эрозии, то есть видно положительное влияние покрытия и РКУП-обработки на линейный износ при эрозии.

Сплав ВТ6 имеет смешанную глобулярно-пластинчатую структуру, с зернами первичной α -фазы, а также с пластинчатой ($\alpha+\beta$) областью. После эрозии крупным порошком 109 μm минимальный размер зерна наблюдается у материала ВТ6_РКУП. И он мало меняется от скорости эрозии, что касается материала с покрытием, скорость зерна растет с ростом скорости эрозии. А для сплава ВТ6 с ростом скорости эрозии незначительно снижается. Что касается эрозии более мелким порошком, то здесь зависимость меняется более сложно - для материалов с покрытием размер зерна уменьшается, а для материалов без покрытия незначительно возрастает. После эрозии крупными частицами структура сплава ВТ6_РКУП при скорости 50 м/с примерно на 80% представлена глобулами размером от 0,5 до 3 μm , при скорости 250 м/с и 200 м/с – примерно на 55-60% состоит из глобул размером 0,5-1,2 μm . Зависимости количества α -фазы (удельная поверхность раздела фаз) от скорости эрозии показали, что при эрозии крупными частицами у сплава ВТ6 (с покрытием и без него) количество α -фазы больше, чем у ВТ6_РКУП, а при эрозии мелкими частицами картина обратная.

Изменение микротвердости после эрозии образцов в разных состояниях показали, что при эрозии более мелкими частицами она имеет меньшие значения, чем при эрозии более крупными частицами. При эрозии частицами 109 μm микротвердость образцов с покрытием с ростом скорости возрастает, причем более резко у сплава ВТ6, чем у ВТ6_РКУП, а у образцов без покрытия она снижается, это связано с воздействием покрытия, имеющего очень высокую твердость. При эрозии мелкими частицами в зависимости от скорости микротвердость меняется более сложно – для сплава ВТ6 как с покрытием, так и без него она сначала возрастает до 100 м/с, а потом падает, а у образцов ВТ6_РКУП, как с покрытием, так и без него до 150 м/с ведет себя одинаково, а дальше образец с покрытием показывает понижение, а без покрытия – повышение твердости.

Весовой износ возрастает с ростом скорости как при эрозии крупными частицами, так и мелкими, но если при эрозии более крупными частицами (109 и 58 μm) большая потеря веса наблюдается у образцов с покрытием, то для эрозии мелкими частицами она больше у образцов без покрытия. Наибольший весовой износ наблюдается при эрозии промежуточными частицами 58 μm как у образцов без покрытия, так и с покрытием. По величине износ выше у образцов без покрытия, покрытие снижает износ при эрозии. Минимальная потеря веса наблюдается у образцов с покрытием ВТ6_ZrN, ВТ6_РКУП_ZrN при эрозии мелкими частицами. Зависимости весового износа для крупнозернистых и мелкозернистых образцов мало отличаются (рис.6).

В дополнение к исследованию снижения массы образцов было измерено увеличение шероховатости поверхности образцов после абразивной обработки. Самая высокая шероховатость после эрозии крупными частицами как на образцах с покрытием, так и без него, меньше значения шероховатости при эрозии средними частицами и самая маленькая – при эрозии самыми мелкими частицами, причем если для средних и крупных частиц она растет с ростом скорости, то при эрозии мелкими частицами ее значение мало меняется.

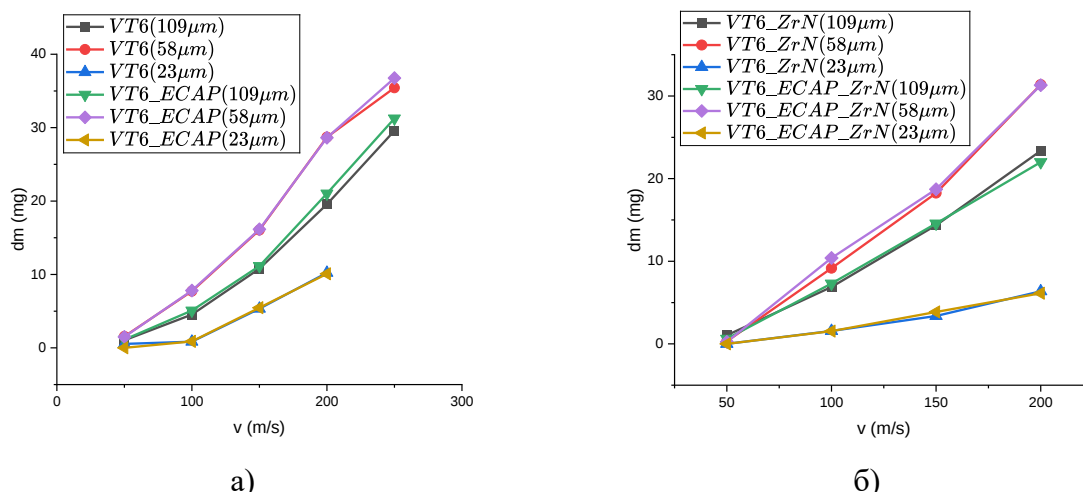


Рисунок 6 - Зависимость весового износа образцов без покрытия (а) и с покрытием при эрозии частицами порошка 109 μm , 58 и 23 μm от скорости эрозии

Заключение

Разработана методика эрозионных испытаний, позволяющая проводить качественный сравнительный анализ поведения материалов в условиях высокоскоростной эрозии. Полученные результаты говорят о необходимости проведения специфических прочностных испытаний для оценки применимости того или иного материала в экстремальных условиях. Повышенные свойства могут проявляться в ограниченных диапазонах режимов воздействия, выявление которых является важнейшей задачей.

Благодарности

«Атрошенко С.А. выполняла свою часть работы при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №124041500007-4)»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh, P., Pungotra, H., Kalsi, N. S. On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications, Materials today: proceedings, 2017. Т. 4, №. 8, pp. 8971-8982.
2. Каблов, Е. Н., Оспенникова, О. Г., Базылева, О. А., Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2011, no. SP2, pp. 13-19.
3. Y.V. Petrov, N.F. Morozov, V.I. Smirnov, Structural macromechanics approach in dynamics of fracture, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 2003, 26(4), p 363-372
4. G.L. Sheldon, Effects of Surface Hardness and Other Material Properties on Erosive Wear of Metals by Solid Particles, J. Eng. Mater. Technol., 1977, 99(2), p 133-137
5. Finnie, Some observations on the erosion of ductile metals, Wear, 1972, 19, p 81-90
6. Samim, P. M. et al. Nanoscale architecture of ZrN/CrN coatings: microstructure, composition, mechanical properties and electrochemical behavior, Journal of Materials Research and Technology, 2021, vol. 15, pp. 542-560.
7. Kablov, E. N., Muboyadzhyan, S. A. Erosion-resistant coatings for gas turbine engine compressor blades, Russian metallurgy (Metally), 2017, vol. 2017, pp. 494-504.
8. Fotovvati, B., Namdari, N., Dehghanghadikolaei, A. On coating techniques for surface protection: A review //Journal of Manufacturing and Materials processing, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 28.
9. Bonu, V. et al. Solid particle erosion and corrosion resistance performance of nanolayered multilayered Ti/TiN and TiAl/TiAlN coatings deposited on Ti6Al4V substrates //Surface and Coatings Technology, 2020, vol. 387, pp. 125531.

10. Sun, Z. P., He, G. Y., Meng, Q. J. et al. Corrosion mechanism investigation of TiN/Ti coating and TC4 alloy for aircraft compressor application //Chinese Journal of Aeronautics, 2020, vol. 33 (6), pp.1824- 1835.
11. Cao X. et al. Sand particle erosion resistance of the multilayer gradient TiN/Ti coatings on Ti6Al4V alloy //Surface and Coatings Technology. – 2019. – T. 365. – C. 214-221.
12. Ul-Hamid A. Microstructure, properties and applications of Zr-carbide, Zr-nitride and Zr-carbonitride coatings: a review, Materials Advances, 2020, vol. 1, no. 5, pp. 1012-1037.
13. S. Lin, K. Zhou, M. Dai, E. Lan, Q. Shi, F. Hu, T. Kuang, C. Zhuang, Structural, mechanical, and sand erosion properties of TiN/Zr/ZrN multilayer coatings, Vacuum, 122 (2015) 179-186.
14. Valiev, R.Z., Zhilyaev, A.P., Langdon, T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2014.
15. Valiev, R.Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T.G., Zehetbauer, M.J., Zhu, Y.T. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later, JOM. 2016, vol. 68, pp. 1216–1226. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1820-6>.
16. Valiev, R.Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T.G., Zehetbauer, M.J., Zhu, Y.T., Fundamentals of superior properties in bulk NanoSPD materials, Mater. Res. Lett., 2015, vol. 4, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1080/21663831.2015.1060543>
17. Semenova, I. P., Polyakov, A. V., Pesin, M. V., Stotskiy, A. G., Modina, Y. M., Valiev, R. Z., & Langdon, T. G., Strength and Fatigue Life at 625 K of the Ultrafine-Grained Ti-6Al-4V Alloy Produced by Equal-Channel Angular Pressing, Metals, 2022, vol. 12, no. 8, pp. 1345.

S.A. Atroshenko^{1,3}, N.A. Kazarinov¹, R.Z. Valiev², R.R. Valiev², Ya. N. Savina², M.N. Antonova¹, Yu.V. Petrov¹

¹St. Petersburg state university, Saint Petersburg, Russia,

²Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

³IPME RAS, Saint Petersburg, Russia,
satroshe@mail.ru

INFLUENCE OF TIN AND ZRN COATINGS ON THE RESISTANCE OF VT6 ALLOY IN DIFFERENT STRUCTURAL STATES TO HIGH-SPEED EROSION

Abstract

The paper considers the main designs of rotary encoder for installation on electric motors. In mass production of motors, it becomes necessary to improve the method of mounting rotary encoder. As a result of the work, a new method of installing encoders on electric motors, which will reduce their cost, unify purchased and manufactured parts, and also reduce their quantity.

Keywords: Variable frequency drive, rotation angle sensor, encoder.