МОДИФИКАЦИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Н.Н. Черенда[1)], А.Б. Петух[1)], Д.П. Русальский[1)], А.К. Кулешов[1)], В.В. Углов[1)], И.А. Солодухин[1)], С.Н. Григорьев[2)], А.А. Верещака[3)], В.М. Асташинский[4)], А.М. Кузьмицкий[4)]

[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, cherenda@bsu.by, alya.petukh.01@mail.ru, rusalsky@bsu.by, kuleshak@bsu.by, uglov@bsu.by, solodukhin@bsu.by*

[2)]*ФГБОУ ВО "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Вадковский пер. 1, Москва, Россия, s.grigoriev@stankin.ru*

[3)]*Федеральное государственное автономное учреждение науки Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, Вадковский пер. 18, стр.1А, Москва, Россия, dr.a.veres@yandex.ru*

[4)]*Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, ул. П. Бровки 15, Минск, Беларусь, ast@hmti.ac.by, antey@hmti.ac.by*

В данной работе было исследовано влияние воздействия компрессионными плазменными потоками, генерируемыми в атмосфере азота, с различным количеством импульсов на параметры рельефа поверхности титанового сплава Ti-6Al-4V и адгезионную прочность покрытия ZrN, нанесенного на обработанную плазмой поверхность. Проведенные исследования показали, что воздействие компрессионных плазменных потоков в используемом диапазоне режимов приводит к увеличению параметров шероховатости и волнистости. Плазменное воздействие также обуславливает формирование поверхностного слоя нитрида титана. Установлено, что предварительная плазменная обработка приводит к увеличению критической нагрузки, при которой происходит отслаивание и истирание покрытия ZrN.

Ключевые слова: шероховатость; волнистость; фазовый состав; адгезия; компрессионные плазменные потоки; титановый сплав.

TITANIUM ALLOY SURFACE RELIEF MODIFICATION BY PLASMA TREATMENT

N.N. Cherenda[1)], A.B. Petuh[1)], D.P. Rusalsky[1)], A.K. Kuleshov[1)], V.V. Uglov[1)], I.A. Saladukhin[1)], S.N. Grigoriev[2)], A.A. Vereschaka[3)], V.M. Astashinski[4)], A.M. Kuzmitski[4)]

[1)]*Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, cherenda@bsu.by, alya.petukh.01@mail.ru, rusalsky@bsu.by, kuleshak@bsu.by, uglov@bsu.by*

[2)]*Moscow State University of Technology "STANKIN", 3a Vadkovsky Lane, 127055 Moscow, Russia, s.grigoriev@stankin.ru*

[3)]*Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences (IDTI RAS), 18a Vadkovsky Lane, 127055 Moscow, Russia, dr.a.veres@yandex.ru*

[4)]*A.V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of sciences of Belarus, 15 P. Brovka Str., 220072 Minsk, Belarus, ast@hmti.ac.by, antey@hmti.ac.by*

The effects of exposure to compression plasma flows generated in a nitrogen atmosphere with different number of pulses on the parameters of the surface relief of the Ti-6Al-4V titanium alloy and the adhesion strength of the ZrN coating deposited on the plasma-treated surface were studied in this work. The findings showed that compression plasma flows treatment in the used range of modes provides a growth of roughness and waviness parameters. Plasma exposure also causes the formation of a surface layer of titanium nitride. It has been established that preliminary plasma treatment leads to an increase in the critical load at which peeling and attrition of the ZrN coating occurs.

Keywords: roughness; waviness; phase composition; adhesion; compression plasma flows; titanium alloy.

Введение

Имплантаты из титановых сплавов активно используются в различных областях медицины. Осаждение модифицирующих покрытий на поверхность имплантатов позволяет придать им необходимые свойства по биологической, физической и химической инертности, добиться полного исключения возможности металлоза, позволяет увеличить стойкость поверхности к бактериальному заражению и уменьшить интенсивность коррозионных электрохимических процессов [1]. Особое внимание при этом должно уделяться адгезии покрытия к материалу имплантата, так как его отслаивание в процессе внедрения имплантата в кость или в процессе жизненного цикла имплантата представляет собой серьезную проблему, ведущую к попаданию в ткани организма токсичных металлов [2]. Одним из путей повышения адгезии является увеличение шероховатости поверхности [3]. Целью данной работы являлось исследование влияния предварительного воздействия компрессионными плазменными потоками (КПП) на параметры рельефа поверхности титанового сплава Ti-6Al-4V и адгезионную прочность покрытия ZrN, нанесенного на обработанную плазмой поверхность.

Материалы и методы исследования

Образцы сплава Ti-6Al-4V (86.45-90 ат.% Ti, 5.3-6.8 ат.% Al, 3.5-5.3 ат.% V) обрабатывались в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии в атмосфере азота 1-6 импульсами (n). Плотность энергии, поглощенной поверхностью составляла 30 Дж/см^2 за импульс. Определение параметров рельефа поверхности образцов проводились с помощью профилометра MarSurf SD 26. Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя исследовалось с помощью рентгеноструктурного анализа в CuK_α излучении на дифрактометре Rigaku Ultima IV. На поверхность образцов, обработанных КПП, методом катодно-дугового вакуумного осаждения наносилось покрытие ZrN толщиной ~ 3 мкм. Испытания на адгезионную прочность проводились с помощью установки «Скретч-тестер». При испытаниях длина трека составляла 15 мм, максимальная нагрузка на алмазный индентер 14 кг, скорость движения индентера – 15 мм/мин.

Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что до плазменного воздействия параметры шероховатости и волнистости составляли: R_a=0.4 мкм, R_z=4.1 мкм, R_{max}=5.9 мкм, W_a=0.24 мкм. При воздействии КПП увеличение количества импульсов ведет к увеличению параметров R_a, R_z и W_a (рис. 1). Причиной формирования развитого рельефа поверхности является плавление поверхности и движение расплава под действием компоненты скорости плазменного потока, направленной вдоль поверхности от центра к краям образца, что создает условия для возникновения гидродинамических неустойчивостей, которые при последующей кристаллизации и обуславливает формирование развитого рельефа.

При генерации КПП в вакуумную камеру напускается азот, что является причиной формирования на поверхности нитрида титана после воздействия. Проведенные исследования с помощью рентгеноструктурного анализа показали, что увеличение количества импульсов ведет к увеличению толщины пленки δ-TiN на поверхности (рис. 2). При увеличении n, как показали ранее проведенные исследования [4], увеличивается температура поверхности, что и приводит к росту диффузионного потока азота при каждом последующем импульсе.

Проведенные исследования на адгезионную прочность покрытия ZrN, осажденного на образцы титанового сплава, показали, что полное отслаивание покрытия от поверхности исходного образца (полное пластичное истирание покрытия до подложки) наблюдалось при критической нагрузке L_{c3}=56 Н. Далее наблюда-

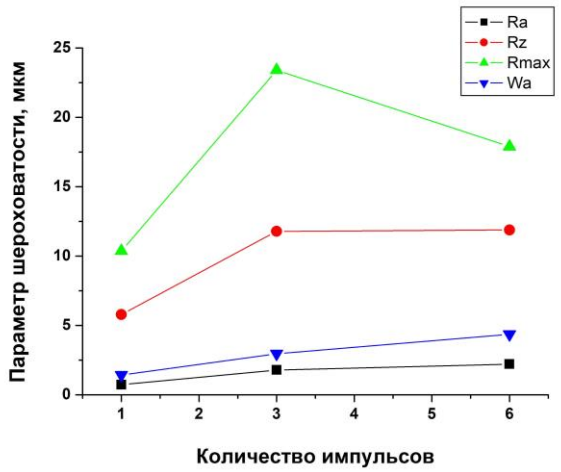

Рис. 1. Зависимости параметров шероховатости и волнистости от *n*.

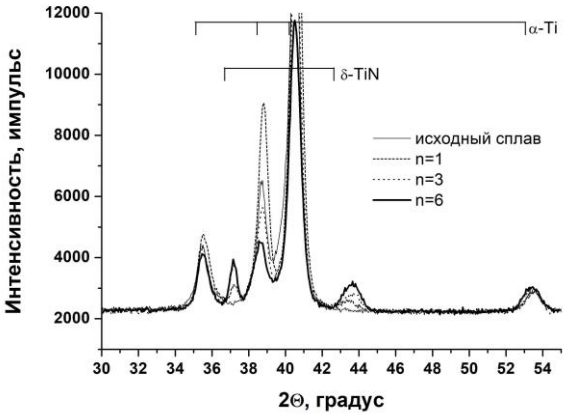

Рис. 3. Дифрактограммы образцов до и после воздействия КПП

лось непрерывное отслаивание покрытия по краям трека. На образцах, предварительно обработанных КПП, значение L_{c3} менялось от 65 Н (n=1) до 116 Н (n=3). Также для трека исходного образца характерно появление трещин до отслаивания. В обработанных образцах таких трещин практически не наблюдается, что также может говорить о повышении адгезионной прочности. Повышение адгезионной прочности может быть связано как с более развитым рельефом поверхности, так и с формированием нитрида титана.

Заключение

Проведенные исследования показали, что воздействие компрессионных плазменных потоков на сплав Ti-6Al-4V в используемом диапазоне режимов приводит к увеличению параметров шероховатости и волнистости поверхности, и сопровождается формированием нитрида титана на поверхности. Предварительная плазменная обработка образцов перед нанесением покрытия приводит к увеличению адгезионной прочности покрытия (значения критической силы L_{c3} изменяются от 56 до 116 Н).

Данная работа выполнена в рамках совместного проекта, финансируемого грантами БРФФИ (№ Т23РНФ-228) и РНФ (№ 21-19-00612)

Библиографические ссылки

1. Grigoriev S., Sotova C., Vereschaka A., Uglov V. and Cherenda N. Modifying Coatings for Medical Implants Made of Titanium Alloys. *Metals* 2023; 13: 718
2. Croll S.G., Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review. *Progress in Organic Coatings* 2020; 148: 105847.
3. Штанский Д.В., Петержик М.И., Башкова И.А., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Шевейко А.Н., Левашов Е.А. Адгезионные, фрикционные и деформационные характеристики покрытий Ti-(Ca,Zr)-(C,N,O,P) для ортопедических и зубных имплантатов. *Физика твердого тела* 2006; 48(7): 1231-1238.
4. Cherenda N.N., Uglov V.V., Martinovich Yu.V., Betanov I.A., Astashynski V.M., & Kuzmitski A.M. Structure of the austenitic steel surface layer subjected to compression plasma flows impact. *High Temperature Material Processes* 2020; 24(3): 211-225.