

**А.С. Калиниченко<sup>1</sup>, В.Г. Лугин<sup>1</sup>, В.С. Нисс<sup>2</sup>, А.Ю. Королев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>3</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

Минск, Беларусь

## **МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Аннотация.* В работе приводятся данные по расчету температуры поверхности титановых изделий, а также результаты металлографического анализа. Показано, что толщина и качество покрытия на титане зависит от подводимой электрической мощности, а также от вида электролита.

**A.S. Kalinichenko<sup>1</sup>, V.L. Lugin<sup>1</sup>, V.S. Niss<sup>2</sup>, A.Yu. Korolyev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

<sup>3</sup>Scientific and Technological Park of BNTU "Polytechnic"

Minsk, Belarus

## **MODIFICATION OF THE SURFACE OF TITANIUM MEDICAL PRODUCTS**

*Abstract.* The paper presents data on the calculation of the surface temperature of titanium products, as well as the results of metallographic analysis. It is shown that the thickness and quality of the coating on titanium depends on the supplied electrical power, as well as on the type of electrolyte.

Титан характеризуется уникальными удельными физико-механическими свойствами при невысокой удельной массе, а также биосовместимостью с человеческой тканью. Это определяет важную роль применения титана и его сплавов в медицине. Однако, титан характеризуется неудовлетворительными триботехническими свойствами, что вызывает необходимость модифицирования поверхности титановых изделий для повышения антифрикционных свойств [1-3].

Модификация поверхности реализуется за счет внедрения в поверхностный слой титановых изделий атомов углерода или азота, которые образуют с титаном соединения с высокими антифрикционными свойствами.

Для успешного модифицирования поверхности титановых изделий необходимо установить факторы и параметры, влияющие на температуру изделия, а также на диффузию атомов из электролита в

поверхностный слой.

Диффузионный поток в направлении оси  $x$  определяется из уравнения первого закона Фика:

$$J = D \frac{dC}{dx},$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  
 $dC/dx$  – градиент концентрации.

При этом, надо учитывать, что коэффициент диффузии зависит от температуры. Поэтому необходимо рассчитать температуру электролита, а также определить температуру поверхности изделия (анода), что позволит определить значения коэффициента диффузии, скорость изменения концентрации атомов углерода и азота. Это, в свою очередь, позволит спрогнозировать глубину слоя изделия, в котором происходит модификация структуры.

Поскольку физическая картина электролитно-плазменной обработки достаточно сложная, связанная с формированием парогазовой прослойки, фазовыми переходами, выделением тепла в результате протекания электрического тока и формированием плазмы, то необходимо упрощение модели и использования значений коэффициентов при средней температуре.

Температура электролита на поверхности анода может быть примерно определена из выражения:

$$T_3 = T_0 + \frac{\varepsilon^2 \kappa}{c_e \rho_e r_a^2 \ln^2 \frac{r_k}{r_a}} \left( t + \frac{2L}{R} e^{\frac{R}{L}t} - \frac{L}{2R} e^{\frac{2R}{L}t} - \frac{3L}{2R} \right).$$

Зная температуру электролита возле анода и, принимая граничные условия 3-го рода, запишем уравнение теплового потока (баланса) на границе электролит – поверхность анода (изделие):

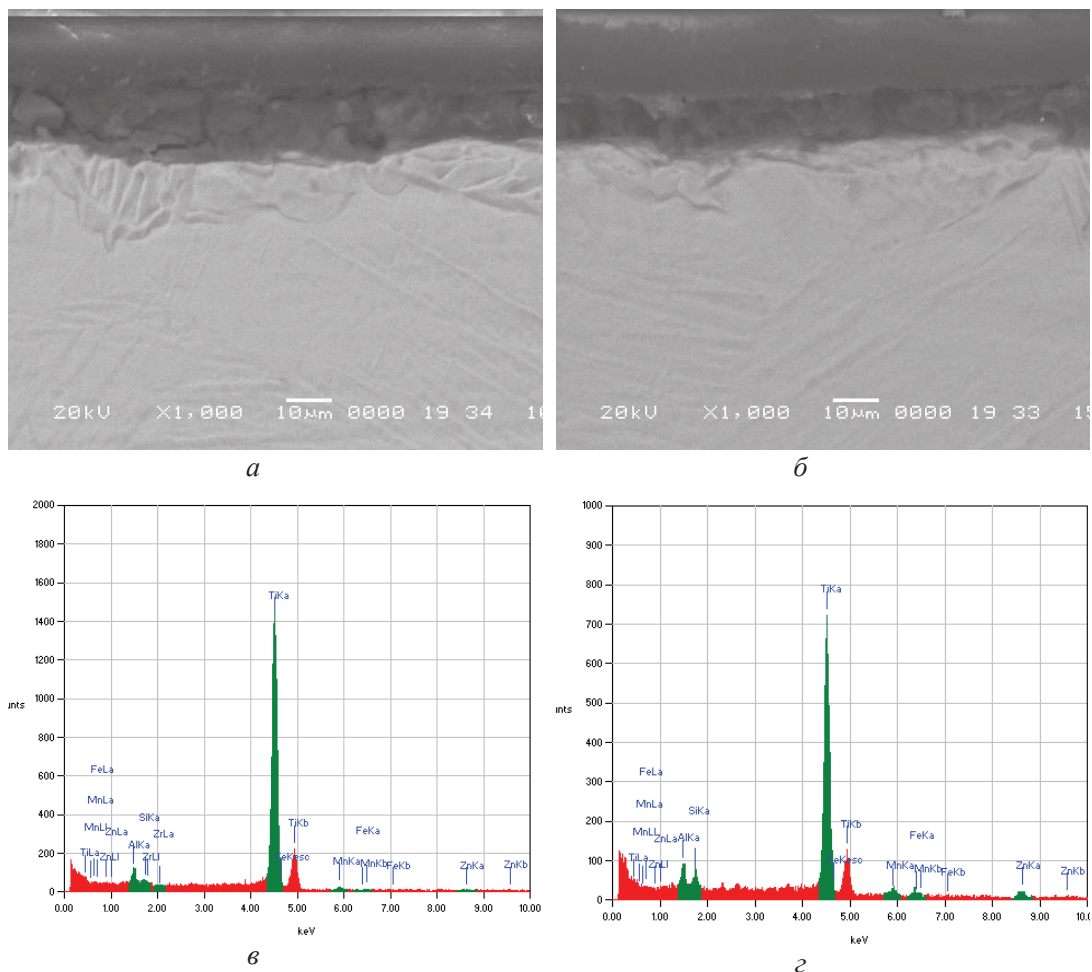
$$q = 2,25 \frac{\varepsilon b U^3}{8\pi \delta^3} = \alpha(T_3 - T_A).$$

Из последнего уравнения может быть определена температура анода  $T_A$  (изделия), для значения которой определяется коэффициент диффузии  $D$  и рассчитывается диффузионный поток.

Выделяемая энергия определяется из выражения:

$$c_e \rho_e dT = \frac{J^2}{\kappa} dT$$

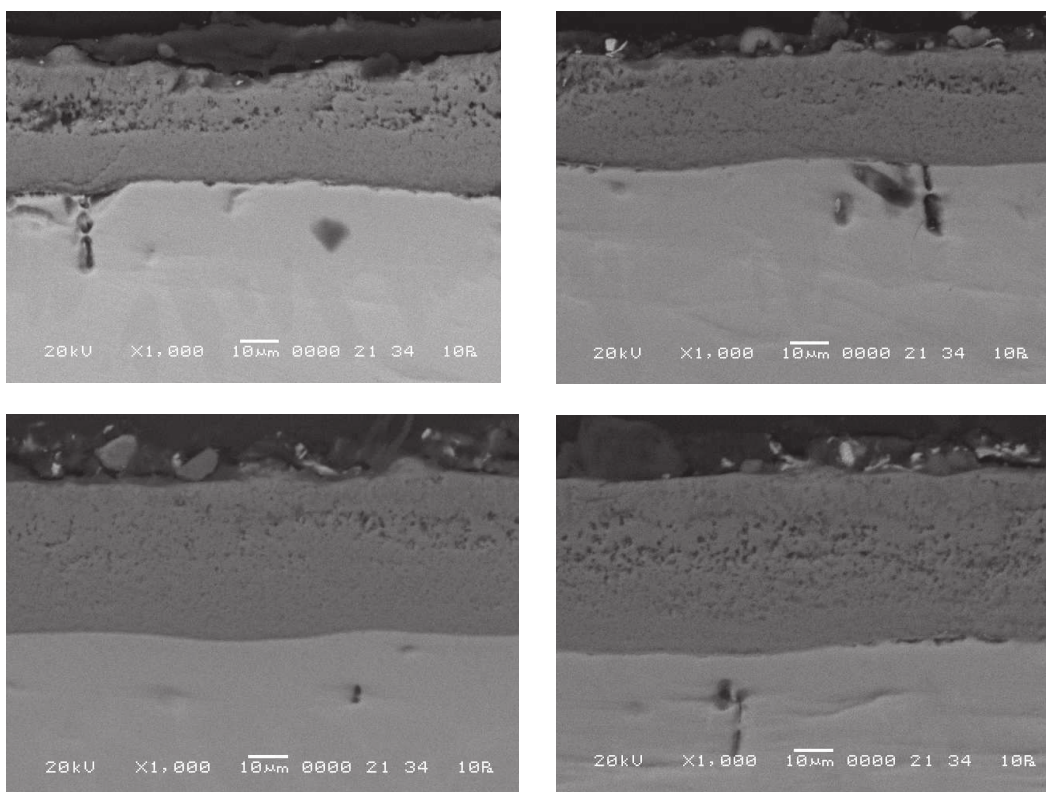
На рис. 1 приведены фотографии микроструктур поверхности для разной подводимой электрической мощности при модифицировании титанового сплава ОТ4 при азотировании, а также приведены соответствующие спектры. Варьировались такие параметры как время обработки и выделяемая электрическая энергия.



*а, в* – при номинальной мощности; *б, г* – при увеличении электрической мощности на 15 %

**Рис. 1 – Микроструктура поверхностных слоев, сформированных на поверхности титанового сплава**

Анализ микроструктур показывает, что увеличение выделяемой мощности на 15 % приводит к формированию более тонкого модифицированного слоя из-за роста толщины парогазового слоя. Однако, микроструктура модифицированного слоя становится более однородной и плотной. Отсутствуют трещины, видимые для процесса, проводимого при минимальной электрической мощности. Это можно объяснить отрицательным влиянием пузырьков электролита, которые разрушаются при более высокой мощности.



**Рис. 2 – Микроструктура титанового сплава при цементации**

Другой характер формирования микроструктуры наблюдался при цементации поверхности титанового сплава при разной подводимой энергии (рис. 2). При минимальной подводимой энергии в нашем случае верхний слой (примерно 50% от толщины всего слоя) характеризуется высокой пористостью и несплошностью. По мере роста подводимой энергии происходит рост формируемого покрытия, в пористость перемещается в середину толщины покрытия. Верхняя и нижняя часть покрытия обладают плотной структурой, практически свободной от пор.

Характер формирующейся структуры покрытия свидетельствует об отличном от азотирования протекании процесса. Процесс цементации обеспечивает формирования карбида титана с микротвердостью свыше 500 *HV*.

Таким образом, варьируя подводимую электрическую мощность и состав электролита можно получить различную толщину модифицированной поверхности со свойствами, отвечающих условиям применения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства*

образования Республики Беларусь в рамках задания 3.2.9 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Электромагнитные, пучково-плазменные и литейно-деформационные технологии обработки и создания материалов».

#### **Список использованных источников**

1. Савич В.В., Сарока Д.И., Киселев М.Г., Макаренко М.В. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах. Минск, «Беларуская навука», 2012, 244 с.
2. Яшкова, С.С., Бобков Н.В. Повышение прочностных характеристик титановых сплавов // Молодой ученый. – 2016. - №28 (132). – С. 215-217.
3. Борозна, В. Ю. Повышение физико-механических свойств титановых сплавов путем модифицирования поверхности и формирования композитного металл-полимерного слоя ультразвуковой обработкой : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.09 / Борозна Вячеслав Юрьевич; [Место защиты: Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН].- Томск, 2011.- 134 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/1043
4. Погребняк, А. Д., Базыль Е. А., Свириденко Н. В. Влияние облучения электронными и ионными пучками на физико-механические свойства титановых сплавов // Успехи физического металловедения / Усп. Fiz. Met. – 2004. – № 5. – С. 257–281.

УДК 628.381.1

**В.Н. Марцуль, И.В. Войтов**

Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ АНАЛИЗА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ НА КЛИМАТ**

*Аннотация.* Представлены результаты анализа жизненного цикла вариантов подготовки к использованию и использования многотоннажных отходов – осадков очистных сооружений по 12 показателям, характеризующим воздействие на окружающую среду.