

## ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ

**Л. П. Башченко<sup>1</sup>, Е. А. Будовских<sup>1</sup>, В. Е. Громов<sup>1</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

Проведены: электровзрывное науглероживание и последующая электронно-пучковая обработка поверхности технически чистого титана марки VT1-0. Установлено, что комбинированная обработка, включающая электровзрывное науглероживание и последующую электронно-пучковую обработку поверхности, приводит к формированию покрытия с высоким уровнем шероховатости, образованного частицами графита, карбида титана и титаном. Методами сканирующей электронной микроскопии исследованы морфология поверхности покрытия, формирующегося на обрабатываемой поверхности, строение и элементный состав легированного слоя в зависимости от поглощаемой плотности мощности при электронно-пучковой обработке.

**Ключевые слова:** титан, электровзрывное легирование, науглероживание, электронно-пучковая обработка, методы исследования

## FORMATION GRADIENT STRUCTURE TITANIUM SURFACE LAYERS AT COMBINED TREATMENT

**L. P. Bashchenko<sup>1</sup>, E. A. Budovskikh<sup>1</sup>, M. E. Gromov<sup>1</sup>, J. F. Ivanov<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup> Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Held electro-explosive carburizing and subsequent electron-beam treatment of surface of commercially pure titanium VT1-0. Found that combined treatment, including electro-explosive alloying and subsequent electron-beam surface treatment leads to the formation of the coating with high roughness formed graphite particles of titanium carbide and titanium. Scanning electron microscopy the morphology of the surface of the coating formed on the treated surface, structure and elemental composition of the doped layer, depending on the absorbed power density in electron-beam treatment.

**Keywords:** titanium, electro-explosive alloying, carburizing, electron-beam treatment, methods of study

В настоящее время все более широко применяются в качестве конструкционных материалов титан и его сплавы. Они характеризуются высокой пластичностью, высокой прочностью и коррозионной стойкостью, особенно в окислительных и хлорированных средах. Однако недостатки (низкая износостойкость, большой коэффициент трения в паре практически со всеми материалами) ограничивают сферу их применения [1].

Одним их эффективных направлений

улучшения эксплуатационных свойств готовых изделий и материалов является модифицирование их поверхностей, которое может быть осуществлено путем комбинированной обработки. При электровзрывном легировании (ЭВЛ) (обработке импульсными плазменными струями, сформированными продуктами электрического взрыва проводников, и последующей самозакалке) формируются новые структурно-фазовые состояния поверхностных слоев [2]. Поверхность титана

## ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ

и титановых сплавов может быть упрочнена при электровзрывном науглероживании [3, 4]. Основная идея такой обработки заключается в импульсном оплавлении и насыщении поверхностных слоев титана углеродом, последующей кристаллизации и образовании упрочняющей фазы карбида титана. Продукты электрического взрыва углеродных волокон (УВ) образуют плазменную струю, служащую инструментом формирования на поверхности титанового сплава слоя, образованного смесью твердого раствора углерода в титане, изолированных частиц карбида титана и частиц УВ [2]. Такая структура обуславливает возможность ее дальнейшей модификации с целью растворения углерода (в виде графита) и увеличения содержания карбида титана.

Электронно-пучковая обработка (ЭПО) с использованием низкоэнергетических сильноточных электронных пучков осуществляется в импульсно-периодическом режиме, что позволяет, с одной стороны, увеличить время нахождения поверхностного слоя в расплавленном состоянии и гомогенизировать его элементный состав, а с другой – сохранить закалочные эффекты, приводящие к формированию субмикронной и наноразмерной структуры [5, 6].

Последующее высокотемпературное реагирование компонентов смеси при электронно-пучковом импульсно-периодическом воздействии на упрочняемую поверхность после электровзрывного науглероживания приводит к взаимодействию титана с частицами УВ и образованию поверхностного слоя, обогащенного карбидом титана. При этом формируется поверхностный слой, обогащенный карбидом титана, что делает возможным осуществление локального упрочнения поверхности деталей из титана и титановых сплавов в местах их наибольшего разрушения в условиях эксплуатации.

Целью настоящей работы являлось исследование градиентной структуры поверхностных слоев технически чистого титана ВТ1-0 при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке легированной поверхности.

Поглощаемая плотность мощности при ЭВЛ составляла  $5,5 \text{ ГВт/м}^2$ . Последующую ЭПО проводили на установке «Соло» в среде аргона при остаточном давлении газа

в рабочей камере  $0,02 \text{ Па}$ . Энергия электронов составляла  $18 \text{ кэВ}$ , частота следования импульсов –  $0,3 \text{ Гц}$ . Изменяли плотность энергии пучка  $E_S$ , время импульсов  $\tau$ , определяемую ими поглощаемую плотность мощности  $q_e$  и число импульсов  $N$ . Условия проведения ЭПО в настоящей работе: поглощаемая плотность мощности  $4,5\text{--}6,5 \text{ ГВт/м}^2$ ; длительность импульсов –  $100$  и  $200 \text{ мкс}$ , количество импульсов –  $10$  и  $20$ . Значения  $E_S$  находились в пределах  $40\text{--}60 \text{ Дж/см}^2$ .

Исследованы различные режимы ЭПО:  
1:  $E_S = 45 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 100 \text{ мкс}$ ,  $q_e = 4,50 \text{ Вт/см}^2$ ,  $N = 10$  имп.;

2:  $E_S = 45 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 200 \text{ мкс}$ ,  $q_e = 2,25 \text{ Вт/см}^2$ ,  $N = 10$  имп.

Исследования показали, что на поверхности образцов после ЭПО присутствуют области, на которых сохранились участки покрытия, образованного частицами УВ, достигающими поверхности из тыла струи (рисунок 1). Покрытие является неоднородным, содержит большое количество микропор. Под покрытием располагается двухслойная зона легирования, в которой наблюдаются многочисленные частицы углеродных волокон (рисунок 2). Общая толщина слоев 1 и 1' достигает  $40 \text{ мкм}$ . Слой покрытия содержит большое количество частиц углеродных волокон, размеры которых изменяются в пределах  $0,7\text{--}2,1 \text{ мкм}$ .

Частицы УВ ориентированы случайным образом как в плоскости шлифа, так и поперек ее. Продольные размеры частиц достигают  $10 \text{ мкм}$ , а поперечные изменяются в пределах  $0,5\text{--}1,5 \text{ мкм}$ . Структура титановой основы имеет субмикроструктурное строение с размерами кристаллитов, изменяющимися в пределах  $200\text{--}350 \text{ нм}$ .

Обработка в режиме 2 приводит к объединению покрытия с зоной легирования, в результате чего ее толщина достигает  $20 \text{ мкм}$ . Частицы УВ, наблюдаемые в зоне легирования после ЭПО в обоих режимах, вследствие растворения в расплаве титана становятся более мелкими, чем в покрытии (рисунок 3): продольные размеры изменяются в пределах  $1\text{--}2 \text{ мкм}$ , поперечные –  $0,1\text{--}0,3 \text{ мкм}$ . При этом толщина слоя 2 после обработки в режиме 2 становится в  $2,5$  раза больше, чем после обработки в режиме 1, и достигает  $40 \text{ мкм}$ .

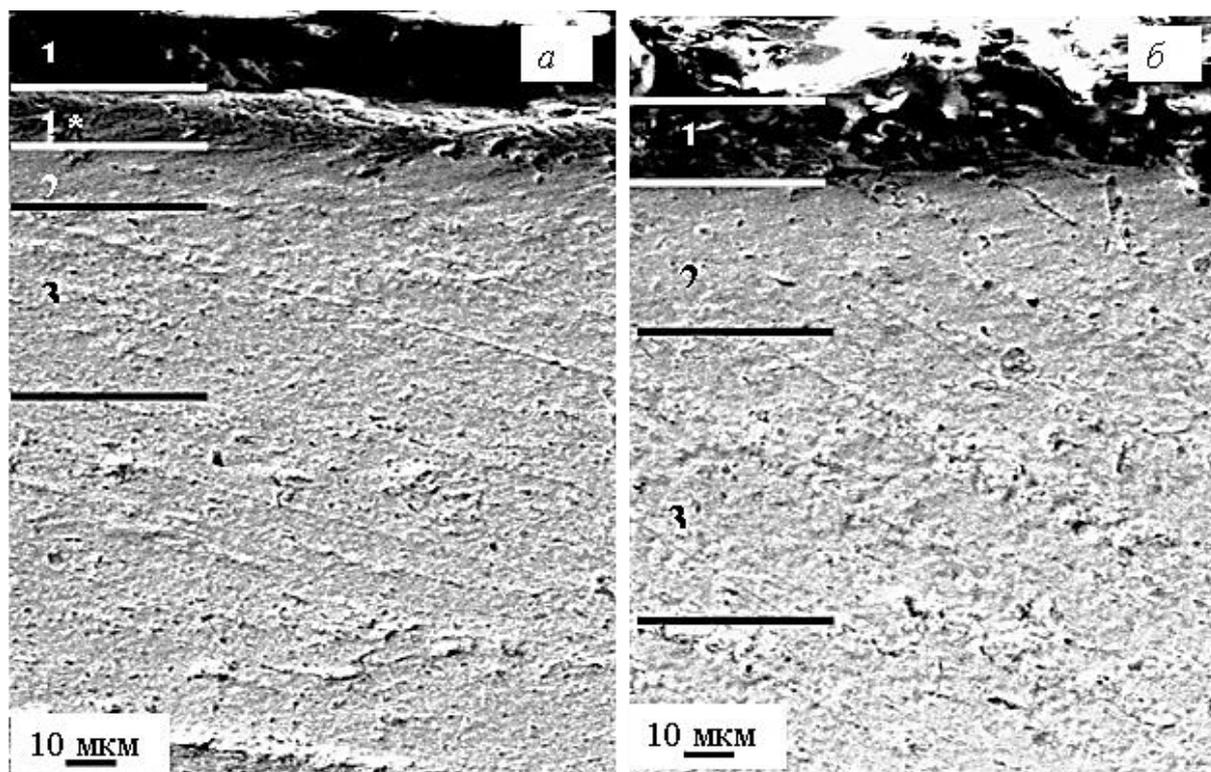


Рисунок 1 – Слоистая структура, формирующаяся при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке титана в режимах 1 (а) и 2 (б)



Рисунок 2 – Структура, сформированная в поверхностном слое титана при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке в режимах 1 (а) и 2 (б)

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНА  
ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ

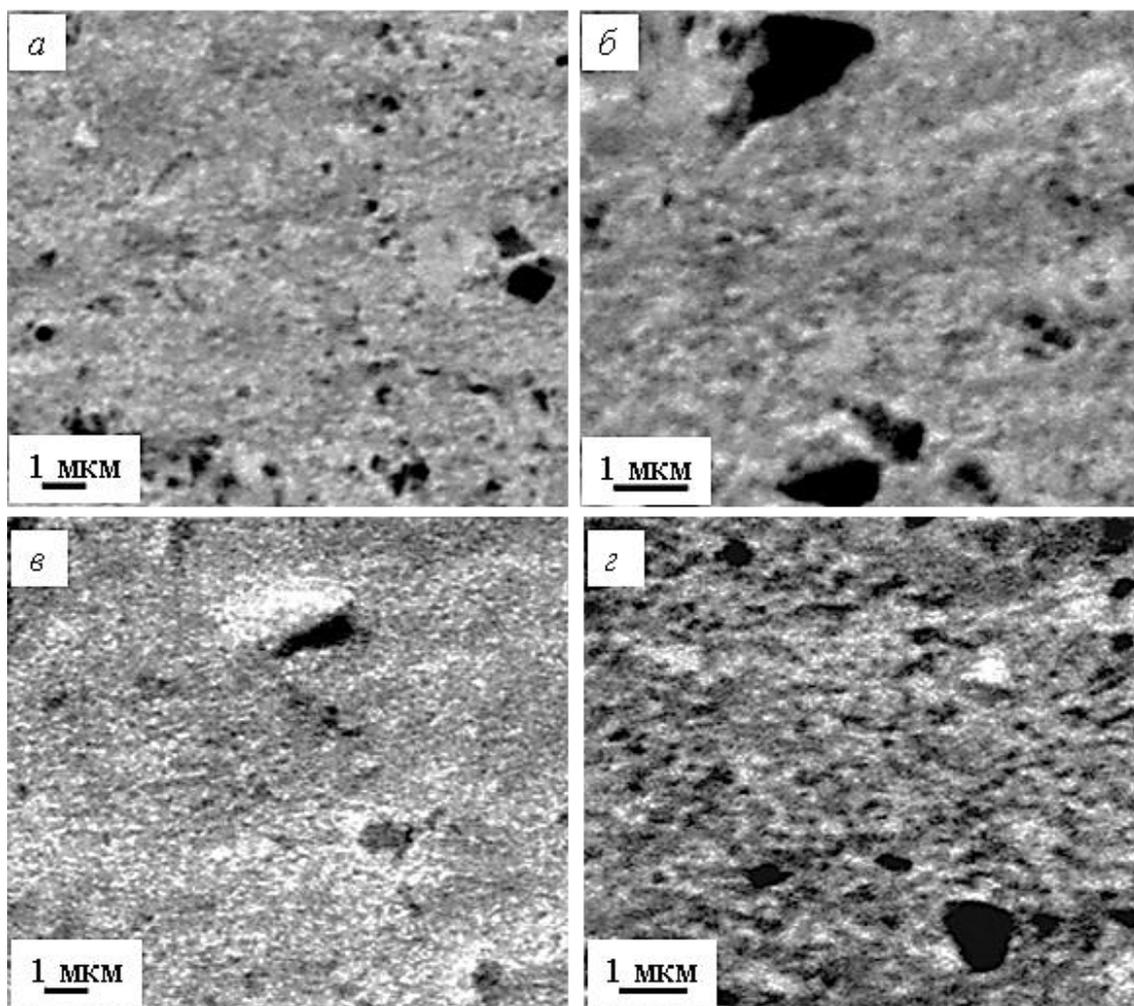


Рисунок 3 – Структура промежуточного слоя 2, сформированная при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке титана в режимах 1 (а, б) и 2 (в, г)

При числе импульсов 20 неоднородность структурно-фазового состояния поверхностного слоя сохраняется. Формируется слоистая структура. На электронно-микроскопических изображениях структуры поперечных шлифов выявляются поверхностный, промежуточный и переходный слои. Подслой 1\* разделяет поверхностный и промежуточный слои. Слои покрытия содержат большое количество частиц УВ, их продольные размеры уменьшаются.

Структура подслоя характеризуется своеобразным распределением графита, напоминающем структуру дендритной кристаллизации. Особенно отчетливо расположение графита в объеме титана выявляется при формировании изображения в отраженных электронах, когда углерод, имеющий меньший, чем титан, атомный вес, на изображениях формирует более темные области.

Такая структура свидетельствует об интенсивных процессах растворения частиц УВ в расплаве титана.

На полученных методами сканирующей электронной микроскопии изображениях структуры можно отметить, что промежуточный слой имеет ячеистую структуру на основе титана (более светлые области), разделенную прослойками графита (темные образования). Средний размер ячеек, обогащенных титаном, составляет 250 нм, а разделяющих их прослоек графита – 100 нм. Иногда в структуре промежуточного слоя обнаруживаются частицы УВ, размеры которых не превышают 1 мкм. При увеличении количества импульсов ЭПО наблюдается измельчение структуры данного слоя. Это относится и к матричной фазе на основе титана, и к включениям графита.

Таким образом, увеличение длительности импульсов при неизменной плотности

энергии и числе импульсов приводит к росту толщины выделенных слоев, сопровождается диспергированием структуры покрытия, формирующегося на поверхности образца при электровзрывном науглероживании. Увеличение числа импульсов при неизменных плотности энергии и длительности импульса сопровождается ростом толщины слоев, снижением степени пористости поверхностного слоя образца, формированием подслоя со структурой дендритной кристаллизации, диспергированием структуры промежуточного слоя.

При увеличении плотности энергии пучка электронов, изменяющейся в пределах от 45 до 60 Дж/см<sup>2</sup> при времени импульсов 100 мкс уменьшается толщина, снижается пористость и происходит диспергирование элементов структуры поверхностного слоя. Уменьшаются размеры частиц графита, присутствующих в промежуточном слое. Увеличиваются размеры кристаллитов титана и размеров включений второй фазы переходного слоя.

Увеличение плотности энергии пучка электронов, изменяющейся в пределах от 45 до 60 Дж/см<sup>2</sup> при времени импульсов 200 мкс, приводит к снижению толщины поверхностного слоя и увеличению толщины промежуточного и переходного слоев; к снижению пористости и диспергированию структуры поверхностного слоя; к снижению шероховатости промежуточного и переходного слоев; к уменьшению количества частиц графита, выявляемых в промежуточном и переходном слоях.

#### Список литературы

1. Колачев, Б. А. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники [Текст] / Б. А. Колачев, Ю. С. Елисеев, А. Г. Братухин, В. Д. Талалаев; под ред. А. Г. Братухина. – М.: изд. МАИ, 2001. – 412 с.
2. Багаутдинов, А. Я. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов [Текст] / А. Я. Багаутдинов, Е. А. Будовских, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.

3. Вострецова, А. В. Карбидизация титановых сплавов при электровзрывном науглероживании и дополнительной термической обработке [Текст] / А. В. Вострецова, С. В. Карпий, Е. А. Будовских [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 6. – С. 60–62.

4. Бащенко, Л. П. Электровзрывное науглероживание титана: рельеф, структура и твердость поверхности [Текст] / Л. П. Бащенко, Н. А. Соскова, Е. А. Будовских, Ю. Ф. Иванов, К. В. Иванов, А. В. Ионина, В. Е. Громов // Перспективные материалы и технологии. – 2012. – № 3. – С. 15–19.

5. Карпий, С. В. Формирование нанокomпозитных слоев электронно-пучковой обработкой титана BT1-0, подвергнутого электровзрывному легированию [Текст] / С. В. Карпий, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Будовских [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 86–88.

6. Иванов, Ю. Ф. Формирование нанокomпозитных слоев на поверхности титана BT1-0 при электровзрывном науглероживании и электронно-пучковой обработке [Текст] / Ю. Ф. Иванов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов, Л. П. Бащенко, Н. А. Соскова, С. В. Райков // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2012. – № 6. – С. 67–70.

**Бащенко Людмила Петровна**<sup>1</sup> – к.т.н., ведущий редактор журнала «Известия вузов. Черная металлургия», [Luda.baschenko@gmail.com](mailto:Luda.baschenko@gmail.com)  
**Будовских Евгений Александрович**<sup>1</sup> – д.т.н., доцент, профессор кафедры физики им. В. М. Финкеля, [budovskih\\_ea@physics.sibsiu.ru](mailto:budovskih_ea@physics.sibsiu.ru)  
**Громов Виктор Евгеньевич**<sup>1</sup> – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики им. В. М. Финкеля, [gromov@physics.sibsiu.ru](mailto:gromov@physics.sibsiu.ru)  
**Иванов Юрий Федорович**<sup>2,3</sup> – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН, [yufi55@mail.ru](mailto:yufi55@mail.ru)

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ), г. Новокузнецк, Россия

<sup>2</sup> ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН» (ИСЭ СО РАН), г. Томск, Россия

<sup>3</sup> ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ), г. Томск, Россия