

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА ВТ1-0 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ СОВМЕСТНО С ОКСИДОМ ЦИРКОНИЯ*

Н.А. СОСКОВА, аспирантка

Е.С. ВАЩУК, м.н.с.

Е.А. БУДОВСКИХ, д.т.н., профессор

В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., профессор

С.В. РАЙКОВ, к.т.н., с.н.с.

(СИБГИУ, г. Новокузнецк)

Ю.Ф. ИВАНОВ, д.ф.-м.н., профессор

(ИСЭ СО РАН, г. Томск)

А.А. ЛОСИНСКАЯ, аспирант

Д.В. ПАВЛЮКОВА, ассистент

(НГТУ, г. Новосибирск)

Статья получена 12 декабря 2012 года

Соскова Н.А. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,

Сибирский государственный индустриальный университет, e-mail: budovskih_ea@physics.sibsiu.ru

Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследована поверхность технического чистого титана после электровзрывного науглероживания совместно с оксидом циркония и электронно-пучковой обработки. Определены режимы последующей электронно-пучковой обработки, выравнивающей рельеф и элементный состав поверхности легирования. Выявлено формирование субмикроструктурной структуры поверхности комбинированной обработки и увеличение ее износостойкости в 1,3 раза.

Ключевые слова: электронно-пучковая обработка, электровзрывное легирование, науглероживание, оксид циркония, титан, сканирующая электронная микроскопия.

Введение

В последние годы получил развитие подход к упрочнению металлов и сплавов, при котором механическая прочность деталей обеспечивается применением экономичных низколегированных сплавов, а специальные свойства поверхности – локальным формированием на ней легированных слоев или нанесением покрытий, свойства которых соответствуют эксплуатационным требованиям. Легирование поверхностных слоев и нанесение покрытий с использованием концентрированных потоков энергии проводят, как правило, с целью повышения таких поверхностно чувстви-

тельных свойств, как твердость, износо- и жаростойкость [1–3]. Большой интерес вызывают методы упрочнения поверхности с использованием импульсных плазменных источников, поскольку они относительно дешевы, позволяют упрочнять сравнительно большие площади поверхности, сочетают термическое воздействие с легированием оплаиваемых слоев. Примером такой обработки является электровзрывное легирование (ЭВЛ) металлов и сплавов [4]. Инструментом воздействия на поверхность при ЭВЛ являются импульсные многофазные плазменные струи, формируемые из продуктов электрического взрыва проводников. Обработка поверхности проводится с ее оплаиве-

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.2065.

нием. При этом вблизи поверхности образуется ударно-сжатый слой с высокими значениями температуры и давления, а в зоне оплавления, насыщаемой компонентами струи, развиваются интенсивные процессы конвективного перемешивания, приводящие к перераспределению легирующих элементов по всей глубине расплава.

Повышение свойств поверхности металлов и сплавов после ЭВЛ осуществляют с помощью электронно-пучковой обработки (ЭПО) [5–9]. Импульсные плазменные струи, используемые при ЭВЛ, и низкоэнергетические высокопоточные электронные пучки имеют сопоставимые значения времени воздействия на поверхность, диаметра зоны обработки (~1 см) и поглощаемой плотности мощности (~1 ГВт/м²), что дает возможность их эффективного совместного применения. В настоящее время уже выполнены работы по изучению результатов их совместного использования при алитировании и бороалитировании, меднении и боромеднении стали 45, алитировании и бороалитировании технически чистого титана [10, 11].

Известно, что легирование цирконием повышает коррозионную стойкость титана в соляной кислоте любой концентрации, в серной кислоте при концентрации менее 75 %. Цирконий также повышает стойкость титана в растворах фосфорной кислоты и в растворах хлоридов. Повышение коррозионной стойкости титановых сплавов можно совместить с упрочнением материала, если наряду с цирконием вводить твердые дисперсные частицы оксида циркония. В результате этого максимальная прочность, коррозионная и износостойкость титановых сплавов сочетаются с высоким модулем упругости и небольшой плотностью [12].

Цель настоящей работы – анализ структуры и свойств поверхности титана ВТ1-0, подвергнутого электровзрывному науглероживанию совместно с оксидом циркония и последующей ЭПО.

Материалы и методы исследования

Электровзрывное легирование осуществляли на установке ЭВУ 60/10 при поглощаемой плотности мощности плазменной струи $q_p =$

$= 5,5 \text{ ГВт/м}^2$ [4]. Взрываемым проводником служила углеродная лента массой 70 мг, в область взрыва вносили порошок оксида циркония массой 50 мг. Для ЭПО использовали установку «СОЛО», разработанную и созданную в Институте сильноточной электроники СО РАН [13]. Плотность энергии пучка электронов E_s варьировали в пределах 45...60 Дж/см² при длительности импульсов электронной обработки t , равной 100 и 200 мкс, и количестве импульсов N , равном 10 и 20 имп. Частота следования импульсов составляла 0,3 с⁻¹.

Исследования поверхности облучения производили методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Трибологические характеристики упрочненного слоя оценивались на основании данных об износостойкости и коэффициенте трения.

Результаты и обсуждение

Поверхность титана после ЭВЛ характеризуется формированием неоднородного покрытия (рис. 1). Анализ его структуры, выполненный методами сканирующей электронной микроскопии в обратно отраженных электронах, выявил резко различающиеся по контрасту участки (рис. 2). Основная часть поверхности окрашена в серый цвет; в белый цвет окрашены области глобулярной формы размерами от 5 до 30 мкм (рис. 2, а); в темный цвет – стержни длиной от 10 до 50 мкм и толщиной от 2 до 4 мкм (рис. 2, б).

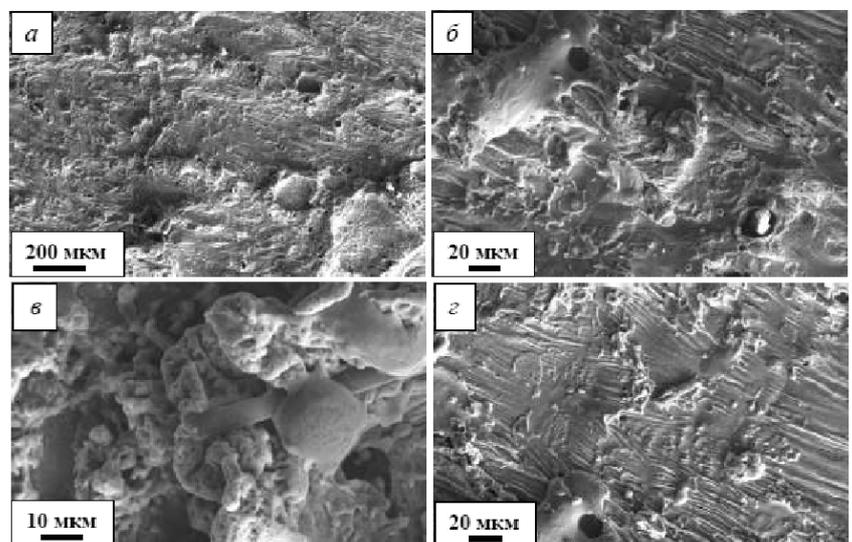


Рис. 1. Морфология поверхности технически чистого титана ВТ1-0 после электровзрывного легирования

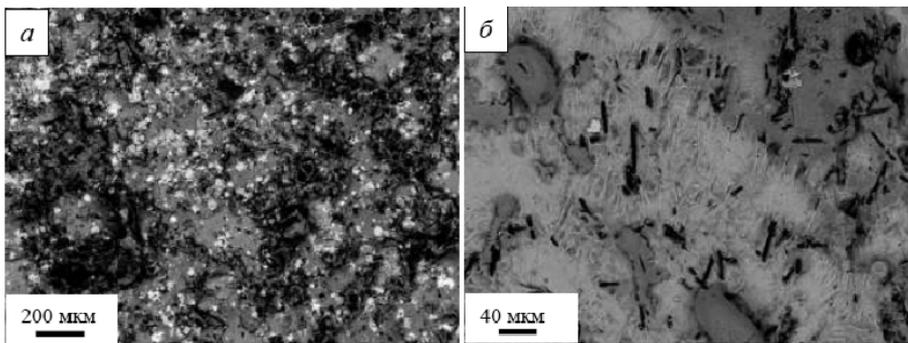


Рис. 2. Структура поверхности технически чистого титана VT1-0, подвергнутого электровзрывному науглероживанию с оксидом циркония (изображение получено в обратно отраженных электронах)

При съемке в обратно отраженных электронах более светлыми выявляются участки материала, обогащенные атомами с большим атомным весом, и наоборот, более темными являются участки поверхности, обогащенные атомами с относительно малым атомным весом [14, 15]. В нашем случае наиболее высоким атомным весом обладает цирконий, следовательно, области глобулярной формы обогащены атомами циркония. Относительно малым атомным весом обладает углерод, следовательно, стержни являются частицами, образовавшимися при разрушении углеграфитовой ленты.

Исследования поверхности ЭВЛ после ЭПО показали, что в центральной части зоны воздействия пучка электронов, размеры которой увеличиваются от 10 мм при $E_s = 45 \text{ Дж/см}^2$ до 18 мм при $E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$, рельеф поверхности выглаживается (рис. 3, а). Формируется поликристаллическая структура (рис. 3, б), средний размер зерен которой увеличивается с ростом E_s от 10 мкм при 45 Дж/см^2 до 22 мкм при 50 Дж/см^2 . Увеличение E_s до 60 Дж/см^2 при $\tau = 100 \text{ мкс}$ сопровождается формированием поликристаллической структуры с высоким уровнем разности зернистости (рис. 3, в). Размер зерен изменяется в пределах от 3 до 40 мкм. Мелкие зерна группируются в отдельные области. Следовательно, при данном режиме облучения в поверхностном слое титана реализуются условия, способствующие протеканию процесса динамической рекристаллизации [16–19]. При этой же E_s и $\tau = 200 \text{ мкс}$ формируется более однородная структура, размер зерен которой изменяется в пределах от 10 до 20 мкм.

В их объеме независимо от E_s выявляется субмикроструктурная ячеистая структура, характерная для скоростной кристаллизации, размер ячеек которой изменяется в пределах $0,25 \dots 0,50 \text{ мкм}$ (рис. 4, з). За пределами центральной зоны образца наблюдается структура, характеризующаяся различной степенью легирования поверхностного слоя. Поверхность легирования сглаживается, однако

присутствуют микротрещины и микрократеры.

После ЭПО изменяется и элементный состав поверхностного слоя. В центральной зоне фиксируется однородный твердый раствор циркония в титане, содержащий сравнительно небольшое количество углерода (рис. 4, а, б). На границе центральной зоны и на периферии зоны ЭПО области, обогащенные цирконием (рис. 4, в, з) и углеродом (рис. 4, д, е), сохраняются.

Износостойкость титана, определяемая по изменению площади поперечного сечения канавки износа, после ЭПО максимальна при $E_s = 45 \text{ Дж/см}^2$, $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$ и приблизительно в 1,3 раза выше износостойкости титана в исходном состоянии (рис. 5). С увеличением E_s износостойкость облученных образцов снижается. При $E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$ износостой-

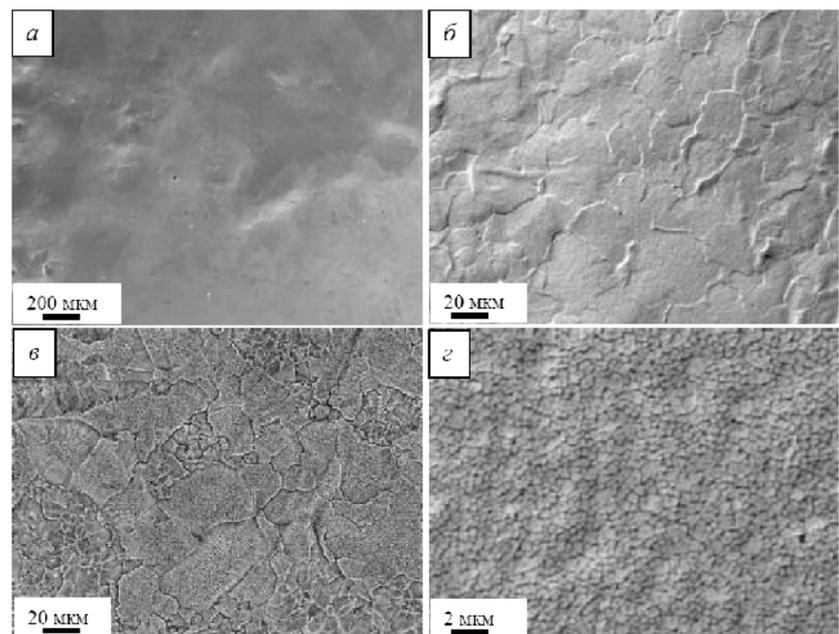


Рис. 3. Структура поверхности технически чистого титана VT1-0, подвергнутого электровзрывному науглероживанию совместно с оксидом циркония и последующей ЭПО

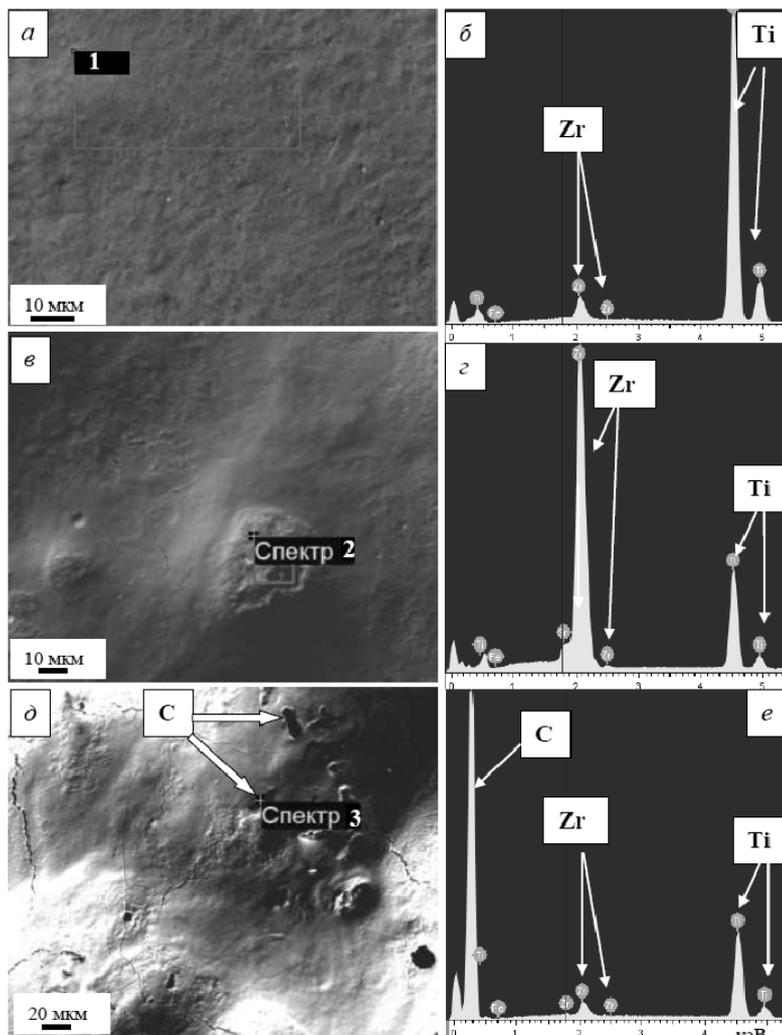


Рис. 4. Структура поверхности технического чистого титана VT1-0 после электровзрывного науглероживания совместно с оксидом циркония и последующей ЭПО (а, в, д) и энергетические спектры (б, г, е), полученные с выделенных на а, в, д участков поверхности, где а, б соответствуют центральной зоне обработки; в–е – участкам на периферии

кость несколько повышается при увеличении длительности и количества импульсов воздействия пучка электронов.

Выявлено, что износостойкость облученной поверхности титана после ЭВЛ и ЭПО увеличивается при снижении коэффициента трения в режимах ЭПО, когда E_s равна 45...60 Дж/см², $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп. (рис. 6).

Выводы

Показано, что электровзрывное легирование технического чистого титана сопровождается формированием упрочненного слоя с субмикроструктурной структурой и неоднородным распределением по поверхности легирующих элементов. Выявлены участки, обогащенные либо атомами циркония, либо

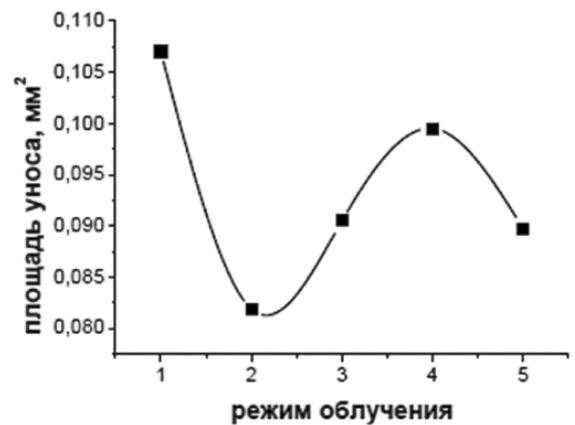


Рис. 5. Зависимость площади поперечного сечения канавки износа от режима ЭПО:

1 – исходный образец; 2 – $E_s = 45$ Дж/см²; $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп.; 3 – $E_s = 50$ Дж/см²; $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп.; 4 – $E_s = 60$ Дж/см²; $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп.; 5 – $E_s = 60$ Дж/см²; $\tau = 200$ мкс, $N = 20$ имп.

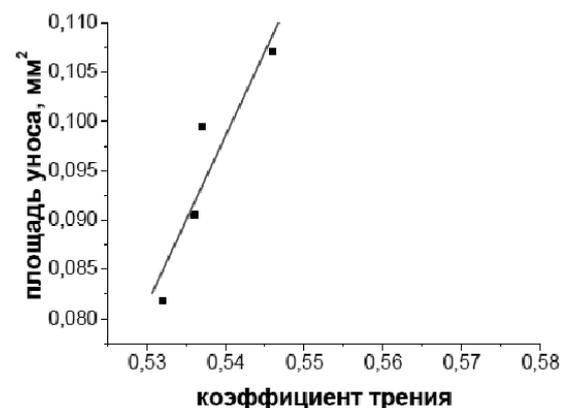


Рис. 6. Корреляционная зависимость, связывающая площадь поперечного сечения канавки износа и коэффициента трения

атомами углерода. Определены режимы последующей электронно-пучковой обработки, выравнивающей рельеф и элементный состав поверхности легирования. Показано, что износостойкость легированного слоя титана после электронно-пучковой обработки увеличивается в 1,3 по сравнению с основной при снижении коэффициента трения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты № 11-02-91150-ГФЕН-а, № 11-02-12091-офи-м-2011) и госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

Список литературы

1. Тюрин Ю.М., Жадкевич М.Л. Плазменные упрочняющие технологии. – Киев: Наукова думка, 2008. – 266 с.

2. *Погребняк А.Н., Тюрин Ю.Н.* Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй // *Успехи физ. наук.* – 2005. – 175. – № 5. – С. 515–544.

3. *Шитко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г.* Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. – Минск: «Навука і тэхніка», 1995. – 280 с.

4. *Физические основы* электронно-лучевого легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд-во СибГУ, 2007. – 301 с.

5. *Электровзрывное* науглероживание титана: рельеф, структура и твердость поверхности / Л.П. Башенко, Н.А. Соскова, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, К.В. Иванов, А.В. Ионина, В.Е. Громов // *Деформация и разрушение материалов.* – 2012. – № 3. – С. 15–19.

6. *Особенности* модифицированных поверхностных слоев титана при электронно-лучевом науглероживании / Л.П. Башенко, И.Т. Ефименко, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, А.В. Ионина, В.Е. Громов // *Физика и химия обраб. материалов.* – 2012. – № 2. С. 65–69.

7. *Фазовый состав* поверхности технически чистого титана VT1-0 после электронно-лучевого карбоборирования / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Н.А. Соскова, С.В. Райков, Е.А. Будовских, А.В. Ионина // *Обработка металлов.* – 2012. – № 1. – С. 77–80.

8. *Влияние* электронно-лучевой обработки на структуру и микротвердость поверхности технически чистого титана VT1-0 после электронно-лучевого науглероживания / Л.П. Башенко, Н.А. Соскова, Ю.Ф. Иванов, А.Д. Тересов, С.В. Райков, Е.А. Будовских, В.Е. Громов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 15–22.

9. *Электронно-лучевая* обработка поверхности сплавов на основе титана, модифицированных плазмой электрического взрыва проводящего материала / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Н.А. Соскова, Ю.А. Денисова, А.Д. Тересов, Е.А. Петрикова, Е.А. Будовских // *Изв. РАН. Серия физ.* – 2012. – Т. 76. – № 1. – С. 1393–1399.

10. *Структура, фазовый состав и свойства* титана после электронно-лучевого легирования и электронно-лучевой обработки: монография / Ю.Ф. Иванов, С.В. Карпий, М.М. Морозов и др. – Новокузнецк: Изд-во НПК, 2010. – 173 с.

11. *Формирование* структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электронно-лучевом легировании и электронно-лучевой обработке / под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 212 с.

12. *Анциферов В.Н., Сиротенко Л.Д., Ханов А.М., Яковлев И.В.* Композиционные материалы и конструкции на основе титана и его соединений. – Новосибирск: Изд-во Института гидродинамики СО РАН, 2001. – 370 с.

13. *Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н.* Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения // *Структура и свойства перспективных металлических материалов.* – Гл. 13. – С. 345–382 / под общ. ред. А.И. Потеева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. – 580 с.

14. *Брандон Д., Каплан У.* Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с.

15. *Кристалл М.М., Ясников И.С., Полуин В.И., Филатов А.М., Ульяненко А.Г.* Сканирующая электронная микроскопия и рентгено-спектральный микроанализ в примерах практического применения. – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.

16. *Горелик С.С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.

17. *Рекристаллизация* металлических материалов / ред. Ф. Хесснер. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.

18. *Ларионов Л.Н., Засимчук Е.Э.* Механизм рекристаллизации деформированных металлов / *Изучение дефектов кристаллического строения металлов и сплавов.* – Киев: Наукова думка, 1966. – С. 70–84.

19. *Ларионов Л.Н.* Отдых, полигонизация, рекристаллизация и рост зерен // *Физические основы прочности и пластичности металлов.* – М.: Металлургиздат, 1963. – С. 255–322.

Electron-beam treatment of titanium VT1-0 surface after electroexplosive carburizing with zirconium oxide

N.A. Soskova, E.S. Vaschuk, E.A. Budovskikh, V.E. Gromov, S.V. Raykov, Yu.F. Ivanov, A.A. Losinskaya, D.V. Pavliukova

By scanning electron microscopy and X-ray spectrum microanalysis the surface electroexplosive carburizing with zirconium oxide commercially pure titanium before and after electron beam treatment was studied. Regimes of the subsequent electron-beam treatment smoothing relief and element composition of the alloying surface were determined. The formation of the submicrocrystalline structure of surface treated and increase of its wear resistance in 1.3 times was revealed.

Key words: electron-beam treatment, electroexplosive alloying, carburizing, zirconium oxide, titanium, scanning electron microscopy.