

УДК 669.295.5.017:621.9.04

## СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ\*

**Багмутов В.П.**, д.т.н., профессор кафедры сопротивления материалов (sopromat@vstu.ru)

**Водопьянов В.И.**, к.т.н., доцент кафедры сопротивления материалов

**Денисевич Д.С.**, аспирант кафедры сопротивления материалов

**Захаров И.Н.**, д.т.н., заведующий кафедрой сопротивления материалов

**Захарова Е.Б.**, инженер кафедры сопротивления материалов

Волгоградский государственный технический университет

(400005, Россия, Волгоград, пр. Ленина, 28)

**Аннотация.** Предложена комплексная технология поверхностного упрочнения титановых сплавов, основанная на сочетании поверхностного легирования бором и углеродом, электромеханической обработки (ЭМО) и безабразивной финишной ультразвуковой обработки (БУФО). Представлены результаты исследования микротвердости и особенностей структурно-фазового состояния поверхностного слоя титанового псевдо- $\alpha$ -сплава типа 5В после различных комбинаций обработок (ЭМО, БУФО, поверхностное легирование). Показано, что для различных схем упрочнения достигается повышение микротвердости поверхности обработанного материала до 30 – 40 %. При этом наибольший эффект наблюдается при использовании в ходе обработок ЭМО + БУФО в качестве обмазки мелкодисперсного порошка литейного графита в комбинации с органическим связующим. Увеличение микротвердости обеспечивается упрочнением за счет интенсивной пластической деформации металла, измельчением зерна (с 50 до 1 мкм) при фазовых превращениях, а также формированием мелкодисперсных упрочняющих боридов и карбидов титана (содержание которых в поверхностном слое достигает 1,88 и 0,46 % соответственно).

**Ключевые слова:** комбинированные технологии, интенсивное температурно-силовое воздействие, поверхностное упрочнение, электромеханическая обработка, ультразвуковая обработка, фазовые превращения, субмикроструктурная структура, микротвердость, титановый сплав.

Перспективным направлением развития систем легирования и модифицирования структуры и свойств титановых сплавов является их упрочнение за счет третьей фазы на основе химических соединений [1 – 5]. Эти соединения должны быть термодинамически стабильными и обладать низким коэффициентом диффузии. Данным требованиям наиболее полно отвечают бор и углерод, которые в ходе химических реакций могут образовывать с титаном химические соединения (карбиды, бориды) [6, 7]. Упрочняющие частицы могут доставляться в поверхностный слой в виде готовых соединений или формироваться в основном металле [8, 9].

В настоящей работе приводятся результаты исследования металлографической структуры, состава и свойств поверхностного слоя титановых сплавов, упрочненных комбинацией электромеханической обработки (ЭМО) [10, 11] и поверхностного ультразвукового легирования (УЗЛ), заключающегося в нанесении легирующих элементов (в виде обмазки) на поверхность детали и последующей безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО) [12, 13].

В качестве источника легирующего элемента использовали мелкодисперсный порошок литейного графита и порошок аморфного бора в различных соотношениях в комбинации с органическим связующим; полученную смесь наносили тонким слоем на поверхность детали перед обработкой.

Технологии ЭМО и БУФО реализованы на типовом токарном станке, перенастройку метода осуществляли путем смены инструментального приспособления в резцедержателе.

Электромеханическую обработку проводили по режимам [10 – 12]: плотность тока  $j = 400 \text{ А/мм}^2$ ; скорость обработки  $v = 0,61 \text{ м/мин}$ ; подача  $S = 0,4 \text{ мм/об}$ ; деформирующее усилие  $F = 1200 \text{ Н}$ ; электрод-инструмент – конические ролики из твердого сплава ВК6С диам. 60 мм, угол заточки  $5^\circ$ , ленточка контакта 0,5 – 0,7 мм.

Режимы БУФО при УЗЛ: частота колебаний излучателя 22 кГц; скорость обработки  $v = 4,71 \text{ м/мин}$ ; подача  $S = 0,07 \text{ мм/об}$ ; деформирующее усилие  $F = 100 \text{ Н}$  [12].

Использовали цилиндрические образцы диам. 15 мм и длиной 150 мм из титанового псевдо- $\alpha$ -сплава 5В. При помощи рассматриваемых технологий на поверхности образца создавали участки, обработанные по каждому из методов: 1 – ЭМО, 2 – БУФО, 3 – ЭМО + БУФО, 4 – УЗЛ + ЭМО, 5 – участок исходного (необработанного) материала. На каждом из участков вырезали по-

\* Исследование выполнено в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России № 2014/16, а также при финансовой поддержке РФФИ по проектам № 14-08-00837 а, № 14-01-97028р\_поволжье\_а.

перечные шлифы для изучения структуры и микротвердости материала по глубине поверхностного слоя. Параметры шероховатости определяли с внешней обработанной поверхности образцов. Исследование микроструктуры образцов, упрочненных по указанной схеме, проводили после каждого из этапов комбинированной обработки.

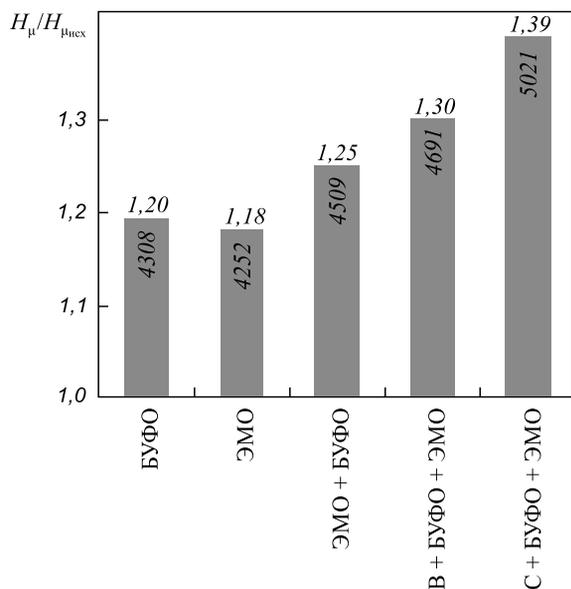


Рис. 1. Относительное изменение средней микротвердости поверхностного слоя образцов титанового сплава 5В после обработок БУФО, ЭМО, комбинированной (ЭМО + БУФО), поверхностного легирования бором и БУФО + ЭМО, поверхностного легирования углеродом и БУФО + ЭМО

Fig. 1. The relative changes of the average microhardness of the surface layer of 5V titanium alloy samples after treatments by NUF, EMT, combined (EMT + NUF), surface alloying with boron and NUF + EMT, surface alloying with carbon and NUF + EMT (UA – ultrasonic alloying; NUF – non-abrasive finishing; EMT – electromechanical treatment)

При исследовании использовали следующее оборудование: двухлучевой электронный сканирующий микроскоп Versa 3D, микротвердомер ПМТ-3М.

На рис. 1 показано изменение микротвердости поверхностного слоя титановых образцов после ультразвуковой, электрохимической и комбинированных обработок в относительных (к исходной микротвердости неупрочненного металла  $H_{\mu_{исх}} = 3600$  МПа) и абсолютных единицах. Деформационное и термомеханическое воздействие в ходе БУФО и ЭМО приводит к некоторому росту поверхностной микротвердости на 15 – 20 %. Увеличение микротвердости титана после ЭМО не превышает 20 – 25 % от исходной. Проведенная после ЭМО обработка БУФО дополнительно повышает микротвердость не более чем на 5 – 10 % для титановых образцов по сравнению с твердостью после ЭМО. После УЗЛ бором и углеродом и последующей ЭМО на поверхности титановых образцов формируется упрочненный слой с повышенной микротвердостью, превышающей исходную на 30 – 40 % (для комбинации легирования бором + БУФО + ЭМО на 30 % и для комбинации легирования углеродом + БУФО + ЭМО на 39 %).

На основании результатов электронной сканирующей микроскопии исследуемых образцов выделены характерные области поверхностного слоя титанового сплава типа 5В после комбинированного упрочнения по схеме УЗЛ + ЭМО (рис. 2):

- поверхностный слой толщиной около 50 мкм с ультрадисперсной структурой (рис. 2, а, зона 1), в котором зерна имеют форму глобул размером до 1 мкм и распределены по направлению движения деформирующего инструмента при обработке (рис. 2, б);
- промежуточный слой (на глубине от 50 до 100 – 150 мкм) с пластинчатой структурой (рис. 2, а, зона 2), ориентированной (также как

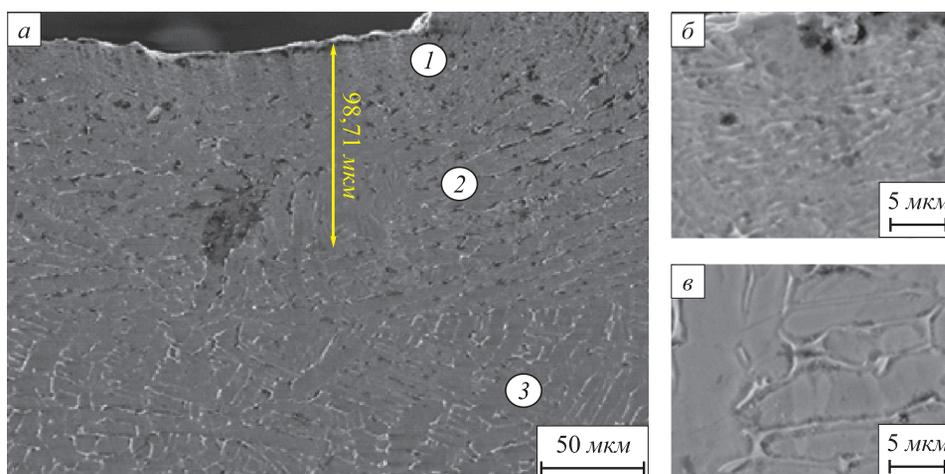


Рис. 2. Микрофотографии характерных зон титанового сплава 5В после комбинированного упрочнения УЗЛ + ЭМО: а – общий вид; б и в – зоны 1 и 2

Fig. 2. Micrographs of characteristic zones of 5V titanium alloy after combined hardening by UA + EMT: а – general view; б and в – area 1 and 2

и в зоне 1) вдоль направления обработки и размером зерен 5 – 20 мкм (рис. 2, в);

- исходная структура (рис. 2, а, зона 3) с размером пластинок до 50 мкм.

Результаты исследования электронно-зондовым методом элементного состава титанового сплава типа 5В после ЭМО и после комбинации УЗЛ + ЭМО приведены в таблице.

После обработки УЗЛ + ЭМО наблюдается увеличение концентрации бора в тонком приповерхностном слое (рис. 2, а, зона 1) до  $0,46 \pm 0,13$  % и концентрации углерода до  $1,88 \pm 0,17$  % (см. таблицу), что значительно выше растворимости этих элементов в  $\alpha$ -твердом растворе титана, которая составляет для бора менее 0,05 %, для углерода – около 0,1 % [14]. Это косвенным образом указывает на присутствие боридов титана TiB и свободных карбидов в структуре материала, которые, однако, не обнаруживаются металлографическим способом при использованных увеличениях (рис. 2, б). В зоне 2 на глубине до 150 мкм также отмечается повышенное содержание углерода ( $0,80 \pm 0,08$  %) и бора ( $0,31 \pm 0,12$  %). В зоне 3 концентрация элементов соответствует исходной (см. таблицу).

Также выявляется наличие в составе обработанного металла азота (от 2,73 до 3,45 %) и на некоторой глубине от поверхности в зоне 2 (рис. 2, а) кислорода – до 1,25 %. Вероятно, это происходит вследствие насыщения данными элементами из воздуха, влияние которых на механические свойства требует дополнительных исследований.

Рассмотрим особенности влияния различных технологических воздействий и их комбинаций на структуру и микротвердость титанового псевдо- $\alpha$ -сплава типа 5В.

Поверхностная пластическая деформация при ультразвуковом воздействии приводит к повышению микротвердости поверхности до 20 %.

В ходе ЭМО основной эффект упрочнения титанового сплава достигается за счет формирования  $\alpha'$ -фазы и интенсивной пластической деформации при высокоскоростном электронагреве. Однако невысокая разница удельных объемов образующихся фаз ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha'$ ), а также быстро протекающие процессы отжига не приводят к

существенному увеличению твердости (которое также не превышает 20 – 25 %).

Комбинирование технологий ЭМО + БУФО позволяет повысить микротвердость не более чем на 5 – 10 % в связи с исчерпанием деформационных механизмов упрочнения.

Формирование в поверхностном слое ультрадисперсных боридов и карбидов титана при поверхностном легировании в сочетании с БУФО + ЭМО приводит к дополнительному повышению микротвердости поверхностного слоя на 10 – 20 %.

Во всех перечисленных случаях структура упрочненной поверхности характеризуется высокой степенью дисперсности. Размер зерен снижается по сравнению с исходным (50 мкм): в зоне термосилового воздействия после ЭМО и после ЭМО + БУФО до 5 – 10 мкм, в упрочненном ЭМО + БУФО легированном слое до 1 мкм.

Предложенная последовательность технологических операций (обмазка – УЗЛ – ЭМО) сопровождается следующими характерными этапами формирования структуры: накопление свободных частиц бора и углерода в дефектах поверхностного слоя в ходе УЗЛ; образование ультрадисперсных боридов и карбидов в ходе ЭМО на стадии нагрева одновременно с  $\alpha \rightarrow \beta$ -фазовым переходом; формирование измельченной глобулярной структуры на стадии охлаждения в процессе  $\beta \rightarrow \alpha$  ( $\alpha'$ )-превращения.

В процессе УЗЛ происходит активизация диффузионных процессов в ходе пластической деформации, результатом которых является переход легирующих элементов в поверхностный слой металла на глубину воздействия. Последующий электронагрев приводит к выделению свободных карбидов и боридов, которые при охлаждении служат дополнительными центрами кристаллизации, увеличивая количество зародышей  $\alpha$  ( $\alpha'$ )-зерен. Полученные модификаторы распределены достаточно равномерно в силу скоротечности процессов нагрева и охлаждения, а также слабой диффузионной подвижности, что способствует формированию однородной глобулярной структуры. При этом выраженная вытянутая текстура зерен соответствует на-

#### Элементный состав сплава

Элемент	Содержание, %, элемента				
	Исходный для ЭМО	Исходный для УЗЛ	После ЭМО	После УЗЛ + ЭМО	
				зона 1	зона 2
Ti	$92,24 \pm 1,23$	$93,67 \pm 1,19$	$89,43 \pm 1,17$	$88,23 \pm 1,11$	$88,74 \pm 1,11$
Al	$4,89 \pm 0,31$	$6,18 \pm 0,38$	$5,14 \pm 0,32$	$5,49 \pm 0,34$	$5,45 \pm 0,34$
Mo	$2,34 \pm 0,08$	$0,15 \pm 0,01$	$1,82 \pm 0,05$	$0,48 \pm 0,02$	$0,43 \pm 0,01$
C	$0,53 \pm 0,06$	0	$0,88 \pm 0,09$	$1,88 \pm 0,17$	$0,80 \pm 0,08$
B	0	0	0	$0,46 \pm 0,13$	$0,31 \pm 0,12$
N	0	0	$2,73 \pm 0,22$	$3,46 \pm 0,27$	$3,02 \pm 0,22$
O	0	0	0	0	$1,25 \pm 0,18$

правлению максимальных сдвиговых деформаций при движении инструмента при ультразвуковой и электро-механической обработках.

Кроме того, как показано в работе [12], ультразвуковое воздействие приводит к повышению качества поверхности за счет выглаживания микронеровностей. На неупрочненной поверхности достигается снижение среднего отклонения профиля до четырех раз, на упрочненной ЭМО – до семи раз.

**Выводы.** Повышение микротвердости поверхностного слоя титанового сплава составляет 30 % для комбинации легирование бором + БУФО + ЭМО и 39 % для комбинации легирование углеродом + БУФО + ЭМО по сравнению с исходной и обеспечивается интенсивной пластической деформацией металла и протекающими фазовыми превращениями в ходе ЭМО, а также присутствием в структуре поверхностного слоя мелкодисперсных упрочняющих карбидов и боридов титана. При металлографическом исследовании образцов из титанового сплава 5В после комбинированной обработки установлено существенное (с 50 до 1 мкм) измельчение зерна. Модификация тонкого поверхностного слоя происходит в результате насыщения углеродом и бором после УЗЛ (до 1,88 и 0,46 % соответственно) с возникновением дополнительных центров зарождения кристаллов и стабилизацией ультрадисперсных боридов и карбидов титана при высокоскоростном электронагреве в ходе ЭМО. Разработан комбинированный метод обработки, заключающийся в нанесении легирующих элементов в виде обмазки на поверхность детали; ультразвуковой обработке подготовленной поверхности с накоплением свободных частиц бора и углерода в дефектах поверхностного слоя; в электро-механической обработке. Наибольшее увеличение микротвердости получено при использовании в качестве обмазки мелкодисперсного порошка литейного графита в комбинации с органическим связующим.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Noli F., Misaelides P., Riviere J.-P. Enhancement of the corrosion resistance of a Ti-Based alloy by ion-beam deposition methods

- // Nucl. Instr. and Meth. In Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2009. Vol. 267. P. 1670.
2. Гусева М.И., Мартыненко Ю.В., Смыслов А.М. Глубокая модификация титанового сплава ионной имплантацией // *Металлы*. 2000. № 3. С. 108 – 112.
  3. Gokul Lakshmi S., Tamilselvi S., Rajendran N., Arivuoli D. Effect of N + ion implantation on the corrosion behavior of Ti-6Al-7Nb and Ti-5Al-2Nb-1Ta orthopaedic alloys in Hanks solution // *J. of applied electrochemistry*. 2004. Vol. 34. № 3. P. 271 – 276.
  4. Шаркеев Ю.П., Кукареко В.А., Ерошенко А.Ю. и др. Ионная имплантация как метод повышения циклической долговечности титана в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях // *Перспективные материалы*. 2011. № 12. С. 136 – 142.
  5. Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А., Громов В.Е. и др. Формирование нанокompозитных слоев на поверхности титана VT1-0 при электровзрывном науглероживании и электронно-пучковой обработке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2012. № 6. С. 67 – 70.
  6. Петровская Т.С. Комплексная обработка поверхности титана // *Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. 2009. Т. 11. № 3. С. 71 – 73.
  7. Панин А.В., Казаченок М.С., Шугуров А.Р. и др. Ультразвуковая обработка наводороженного технического титана VT1-0 // *Тяжелое машиностроение*. 2010. № 2. С. 36 – 39.
  8. Башенко Л.П., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А. Модификация структуры поверхностных слоев титана VT1-0 при электровзрывном карбоборировании и электронно-пучковой обработке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 3. С. 68 – 70.
  9. Бровер Г.И., Бровер А.В., Дьяченко Л.Д. Некоторые особенности структуры и свойств поверхностных слоев титана после лазерных закалки и легирования // *Изв. вуз. Цветная металлургия*. 2005. № 6. С. 51 – 55.
  10. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В.П. Багмутов, С.Н. Паршев, Н.Г. Дудкина, И.Н. Захаров. – Новосибирск: Наука, 2003. – 318 с.
  11. Багмутов В.П., Водопьянов В.И., Захаров И.Н., Горунев А.И. Влияние интенсивной термосиловой обработки на структуру и свойства титановых псевдо- $\alpha$ -сплавов в условиях ЭМО // *Металлы*. 2013. № 5. С. 93 – 97.
  12. Багмутов В.П., Захаров И.Н., Горунев А.И. и др. Комбинированное поверхностное упрочнение стальных и титановых сплавов на основе электромеханической и ультразвуковой обработок // *Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. 2013. Т. 7. № 6 (109). С. 68 – 71.
  13. Холопов Ю.В., Зинченко А.Г., Савиных А.А. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов. – Л.: ЛДНТП, 1988. – 18 с.
  14. Цвиккер У. Титан и его сплавы / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.

Поступила 16 января 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. No. 4, pp. 272–276.

## STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF TITANIUM ALLOYS AFTER ELECTROMECHANICAL TREATMENT AND ULTRASONIC SURFACE ALLOYING

**Bagmutov V.P.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair strength of materials (sopromat@vstu.ru)

**Vodop'yanov V.I.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair strength of materials

**Denisevich D.S.**, Postgraduate of the Chair strength of materials

**Zakharov I.N.**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair strength of materials

**Zakharova E.B.**, Engineer of the Chair strength of materials

**Volgograd State Technical University** (28, Lenina ave., Volgograd, 400005, Russia)

**Abstract.** The authors proposed the complex technology of surface hardening of titanium alloys based on a combination of surface alloying with boron and carbon, electromechanical treatment (EMT) and non-abra-

sive ultrasonic finishing (NUF). The results of the study of microhardness and features of the structural-phase state of the surface layer of 5V titanium pseudo- $\alpha$ -type alloy were presented after various combinations of treatments (EMT, NUF, surface alloying). It was shown that for a variety of schemes hardening was achieved by increasing the surface microhardness of the treated material to 30 – 40 %. The greatest effect can be observed when using alloying agent during EMT + NUF (graphite cast powder in combination with an organic binder). Increase in microhardness was provided due to the hardening by severe plastic deformation of the metal, grain size refinement (from 50 to 1  $\mu$ m) during phase transitions, as well as the formation of fine reinforcing borides and carbides of titanium (whose content in the surface layer increased up to 1.88 and 0.46 %, respectively).

**Keywords:** combined technologies, intensive temperature-force effect, surface hardening, electro-mechanical treatment, ultrasonic treatment, phase transformations, submicrocrystalline structure, microhardness, titanium alloy.

## REFERENCES

1. Noli F., Misaelides P., Riviere J.-P. Enhancement of the corrosion resistance of a Ti-based alloy by ion-beam deposition methods. Nucl. Instr. and Meth. In: *Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2009, Vol. 267, pp. 1670.
2. Guseva M.I., Martynenko Yu.V., Smyslov A.M. Deep modification of titanium alloy by ionic implantation. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2000, no. 3, pp. 114–119.
3. Gokul Lakshmi S., Tamilselvi S., Rajendran N., Arivuoli D. Effect of N + ionimplantation on the corrosion behavior of Ti-6Al-7Nb and Ti-5Al-2Nb-1Ta orthopaedic alloys in Hanks solution. *J. of applied electrochemistry*. 2004, Vol. 34, no. 3, pp. 271–276.
4. Sharkeev Yu.P., Kukareko V.A., Eroshenko A.Yu., Kuchina A.S., Belyi A.V., Bataev V.A., Smirnov A.I., Veselov S.V. Ion implantation as an increase method of titanium fatigue life in large-grained and ultrafine-grained states. *Perspektivnye materialy*. 2011, no. 12, pp. 136–142. (In Russ.).
5. Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Bashchenko L.P., Soskova N.A., Raikov S.V. Formation of nanocomposite layers on the surface of VT1-0 titanium at electroexplosive carburization and electron-beam treatment. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 6, pp. 67–70. (In Russ.).
6. Petrovskaya T.S. Integrated processing of titanium surface. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii*. 2009, Vol. 11, no. 3, pp. 71–73. (In Russ.).
7. Panin A.V., Kazachenok M.S., Shugurov A.R., Chernov I.P., Lider A.M., Kretova O.M. Ultrasonic processing of hydrotreated technical BT1-0 titanium. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2010, no. 2, pp. 36–39. (In Russ.).
8. Bashchenko L.P., Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A. Modification of the titanium VT1-0 surface layers structure after electroexplosive carboboronizing and electron-beam treatment. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 3, pp. 68–70. (In Russ.).
9. Brover G.I., Brover A.V., D'yachenko L.D. Some peculiarities of structure and properties of surface layers of titanium after laser hardening and alloying. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2005, no. 6, pp. 51–55. (In Russ.).
10. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N. *Elektromekhanicheskaya obrabotka: tekhnologicheskie i fizicheskie osnovy, svoystva, realizatsiya* [Electromechanical processing: technological and physical bases, properties, realization]. Novosibirsk: Nauka, 2003. 318 p. (In Russ.).
11. Bagmutov V.P., Vodop'yanov V.I., Zakharov I.N., Gorunov A.I., Denisevich D.S. Effect of intense thermomechanical treatment on the structure and properties of titanium pseudo- $\alpha$  alloys during electromechanical treatment. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, no. 5, pp. 712–715.
12. Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Gorunov A.I., Zakharova E.B., Denisevich D.S., Kosogorov A.V. Composite surface hardening of steel and titanium alloys on the bases of electromechanical and ultrasonic processing. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii*. 2013, Vol. 7, no. 6 (109), pp. 68–71. (In Russ.).
13. Kholopov Yu.V., Zinchenko A.G., Savinykh A.A. *Bezabrazivnaya ul'trazvukovaya finishnaya obrabotka metallov* [Nonabrasive ultrasonic final metal processing]. Leningrad: LDNTP, 1988. 18 p. (In Russ.).
14. Zwicker Ulrich. Titan und Titan-Legierungen. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1974. (Russ.ed.: Zwicker U. *Titan i ego splavy*. Moscow: Metallurgiya, 1979. 512 p.)

**Acknowledgements.** The study was performed in the framework of the state task of the Ministry of Education and Science no. 2014/16, and with the financial support of Russian Foundation for basic research under project no. 14-08-00837 and no. 14-01-97028 Povolgie.

Received January 16, 2014