

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СПЛАВА ВТ6 ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ С КАРБИДОМ БОРА И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ*

Т.Ю. КОБЗАРЕВА¹, аспирант
В.Е. ГРОМОВ¹, доктор физ.-мат. наук, профессор
Ю.Ф. ИВАНОВ², доктор физ.-мат. наук, профессор
С.В. КОНОВАЛОВ¹, доктор техн. наук, профессор
Е.А. БУДОВСКИХ¹, доктор техн. наук, профессор
В.А. БАТАЕВ³, доктор техн. наук, профессор
¹СибГИУ, г. Новокузнецк,
²ТПУ, г. Томск,
³НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 25 сентября 2015

Рецензирование 23 октября 2015

Принята к печати 15 ноября 2015

Кобзарева Т.Ю. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42,
 Сибирский государственный индустриальный университет,
 e-mail: kobzarevatanya@mail.ru

Проведены исследования, направленные на выявление изменений в поверхностном слое титанового сплава ВТ6 после комбинированной обработки. Комбинированная обработка поверхности титанового сплава ВТ6 заключалась в легировании плазмой, формирующейся при электрическом взрыве фольги титана с навеской порошка карбида бора и последующем облучении высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. В качестве взрываемого проводника при электровзрывном легировании использовали фольгу титана. В область взрыва на титановую фольгу помещали навеску порошка карбида бора В₄С. Для ЭВЛ использовали лабораторную электровзрывную установку типа ЭВУ 60/10. Основные параметры для осуществления импульсного жидкофазного легирования задавали величиной зарядного напряжения накопителя энергии ускорителя, диаметром канала сопла и расстоянием от его среза до образца. Последующую термическую обработку поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 осуществляли высокоинтенсивным импульсным электронным пучком на установке СОЛО (ИСЭ СО РАН).

В результате исследования выявлено, что электровзрывное легирование поверхностного слоя образцов титанового сплава ВТ6 приводит к формированию высокоразвитого рельефа. Методами сканирующей электронной микроскопии выявлено, что в поверхностном слое обработки наблюдается неоднородное распределение легирующих элементов. Существенное различие их концентрации в выявленных слоях приводит к отличию их прочностных и трибологических свойств. Последующая электронно-пучковая обработка поверхности легирования приводит к выравниванию поверхности легирования. Происходит формирование многослойной структуры, а распределение легирующих элементов в поверхностном слое становится более равномерным. Анализ поверхности обработки, облученной электронным пучком, выявил наличие двух характерных элементов структуры, сформировавшихся в результате последующей обработки высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Первый – это области с игольчатой структурой, размеры игл которой составляют 1...10 мкм. Исследования поперечных шлифов титанового сплава после комбинированной обработки позволили определить толщину модифицированного слоя, которая составляет не более 30 мкм. Итак,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-03411а) и государственного задания Минобрнауки (№ 2708 и № 3.1496.2014/К).

можно сделать вывод о том, что электровзрывное легирование и сверхскоростное охлаждение при импульсной обработке приводят к формированию структуры субмикро- наномасштабного уровня, что позволяет повысить прочностные и трибологические свойства поверхности обработки.

Ключевые слова: титан, карбид бора, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, структурно-фазовые состояния.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-102-112

Введение

Титановые сплавы применяются для изготовления крупногабаритных сварных и сборных конструкций летательных аппаратов, для изготовления баллонов, работающих под внутренним давлением в широком интервале температур от 196 до 450 °С, и целого ряда других конструктивных элементов [1, 2]. По типу структуры сплав ВТ6 относится к классу двухфазных сплавов, содержащих α -Ti и β -Ti [3]. Титан и его сплавы характеризуются отсутствием хладноломкости, высокой пластичностью и прочностью, а также коррозионной стойкостью, особенно в окислительных и хлорированных средах, кроме того, они обладают низкими антифрикционными свойствами [4, с. 681–685]. Помимо перечисленных данные материалы обладают низкой износостойкостью, высокой склонностью к налипанию, большим коэффициентом трения в паре с большинством материалов [5]. Перечисленные недостатки титановых сплавов ограничивают их использование при изготовлении деталей, подверженных трению.

Одним из перспективных способов модификации поверхности металлов и сплавов является метод электровзрывного легирования (ЭВЛ), в котором инструментом воздействия на поверхность служат импульсные плазменные струи, формируемые при разряде емкостных накопителей энергии через токопроводящий материал. Рабочее вещество ускорителя плазмы применяется как для нагрева поверхностного слоя модифицируемого материала, так и для его легирования [6]. Основное преимущество ЭВЛ перед другими аналогичными способами обработки поверхности, использующими плазму взрывчатых веществ и магнитоплазменных компрессоров, состоит в том, что в качестве плазмообразующего вещества, которое собственно и вносится в поверхностный слой мишени, могут быть использованы любые электропроводящие материалы – тонкие фольги металлов и спла-

вов, углеродистые и другие волокна. Кроме того, в область взрыва могут быть помещены порошковые навески того или иного вещества. Они увлекаются формируемой струей и переносятся на облучаемую поверхность, частично переходя в плазменное состояние. Плазменные струи электровзрывных источников могут быть использованы также для обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей [7, с. 94–96]. Таким образом, ЭВЛ позволяет в едином технологическом цикле провести оплавление поверхностного слоя детали, выполнить ее жидкофазное легирование продуктами взрыва проводников с последующей скоростной самозакалкой. Для реализации технологии ЭВЛ могут быть использованы промышленные разрядно-импульсные установки, обладающие конструктивной простотой, высокой надежностью и сравнительно низкой стоимостью.

Сдерживающим фактором для широкого практического использования ЭВЛ является высокий уровень шероховатости поверхности модифицирования и существенная неоднородность распределения легирующих элементов в объеме легированного слоя. Оба недостатка – это следствие сложного строения плазменного потока, формирующегося при электрическом взрыве токопроводящего материала, а именно присутствие в плазменном потоке частиц взрывающейся фольги и навески порошка. Первым модифицируемую поверхность достигает поток плазмы и плавит некоторый поверхностный слой; несколько позже поверхность образца достигают осколки взрывающегося проводника и не испарившиеся частицы порошковой навески, которые могут проникать в объем расплавленного слоя, а также формировать на поверхности образца покрытие.

В ряде работ показано, что в качестве инструмента, позволяющего успешно бороться с указанными недостатками, могут быть использованы источники импульсных высокоинтенсивных низкоэнергетических электронных пуч-

ков (энергия электронов до 30 кэВ, плотность энергии до 100 Дж/см², длительность импульса 50...200 мкс) [8–11]. Импульсные электронные пучки с указанными параметрами обеспечивают высокоскоростную кристаллизацию и самозакалку поверхностных слоев металлических, металлокерамических и керамических материалов со скоростями охлаждения до 10⁶ К/с [12, с. 155–156]. Данные условия облучения создают возможность формирования наноразмерных нанофазных поверхностных слоев с низким уровнем шероховатости, обладающих повышенными физико-механическими свойствами [13–15].

Целью исследования, направленного на разработку комбинированного метода модификации поверхности титанового сплава ВТ6 порошком карбида бора, является анализ структурного состояния слоя обработки, сформированного в результате электровзрывного легирования и последующей электронно-пучковой обработки (ЭПО).

Материал и методика исследований

При исследовании использован сплав на основе титана ВТ6 [1]. Химический состав сплава соответствовал ГОСТ 19807-91 (см. таблицу).

Обработку поверхностного слоя осуществляли методами электровзрывного легирования [6, 9]. В качестве взрывающего проводника использовали фольгу титана толщиной 0,1 мкм. В область взрыва на титановую фольгу помещали навеску порошка карбида бора В₄С массой 496 мг. Для ЭВЛ использовали лабораторную электровзрывную установку типа ЭВУ 60/10 (энергоемкость 60 кДж; собственная частота разряда 10 кГц; максимальное значение заряда 5 кВ; максимальная производительность 10 цикл/ч; средняя потребляемая мощность 0,55 кВт) с характерными значениями поглощаемой плотности мощности при обработке поверхности материала ~10⁹ Вт/м², давлении в ударно-сжатом слое плазмы вблизи облучаемой поверхности 10⁶...10⁷ Па, времени обработки ~100 мкс, тол-

щины зоны легирования в ее центральной области 20...40 мкм. Условия для осуществления импульсного жидкофазного легирования задавали величиной зарядного напряжения накопителя энергии ускорителя, диаметром канала сопла и расстоянием от его среза до образца. Формирование плазменного потока выполняли при напряжении $U = 2,4$ кВ [15].

Последующую термическую обработку поверхностного слоя осуществляли высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (установка СОЛО, ИСЭ СО РАН) [9]. Облучение электронным пучком проводили при следующих параметрах работы источника электронов: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов $E_s = 50$ Дж/см² и $E_s = 60$ Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов $\tau = 100$ мкс; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; количество импульсов облучения $N = 10$.

Исследование структуры модифицированного материала осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии. Элементный состав поверхностного слоя изучали методами микрорентгеноспектрального анализа.

Результаты и обсуждение

Характерной особенностью электровзрывного легирования является формирующийся высоко развитый рельеф поверхности титанового сплава ВТ6 после облучения, представленный на рис. 1, а. На рис. 1, б изображена структура поверхности титанового сплава после карбоборирования и дальнейшей электронно-пучковой обработки при следующих параметрах: $E_s = 50$ Дж/см², $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп. На рис. 1, в показано изображение структуры поверхности титанового сплава после карбоборирования и последующей электронно-пучковой обработки при $E_s = 60$ Дж/см², $\tau = 100$ мкс, $N = 10$ имп.

Методами сканирующей электронной микроскопии выявляется контраст, который свидетельствует о неоднородном распределении легирую-

Химический состав сплава ВТ6 (вес. %)

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
До 0,6	До 0,1	До 0,1	3,5...5,3	До 0,05	86,45...90,9	5,3...6,8	До 0,3	До 0,2	До 0,015	Прочих 0,3

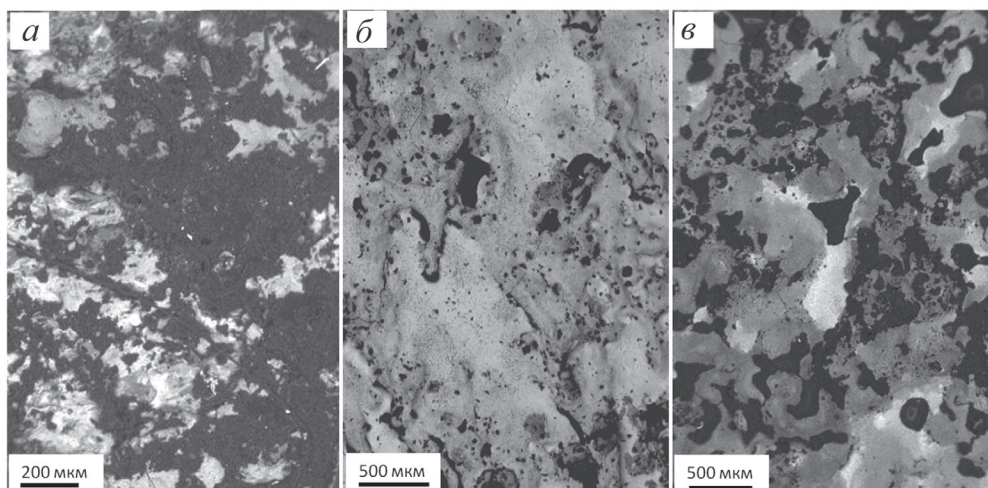


Рис. 1. Структура поверхности титанового сплава ВТ6 после комбинированной обработки

щих элементов в поверхностном слое образца [5]. Объемы материала, обогащенные легкими элементами (углерод и бор), выглядят более темными по сравнению с объемами материала, обогащенными металлическими атомами, имеющимися в составе исследуемого сплава (рис. 1).

Последующая электронно-пучковая обработка приводит к существенному преобразованию рельефа и распределению легирующих элементов в поверхностном слое. Рельеф поверхности выглаживается; черно-белый контраст на изображении поверхности модифицирования замещается преимущественно серым (рис. 1, б, в). Последнее указывает на более равномерное распределение в плоскости шлифа легирующих

элементов, инициированное облучением электронным пучком.

Высокоскоростное плавление и последующая скоростная самозакалка поверхностного слоя вследствие отвода тепла в интегрально холодный объем образца приводят к выглаживанию рельефа и существенному преобразованию структуры материала. Изображения структуры слоя, формирующегося при дополнительной обработке модифицированного титана электронным пучком с параметрами 18 кэВ; $E_s = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$, представлены на рис. 2.

Анализ поверхности обработки, облученной электронным пучком, выявил два характерных

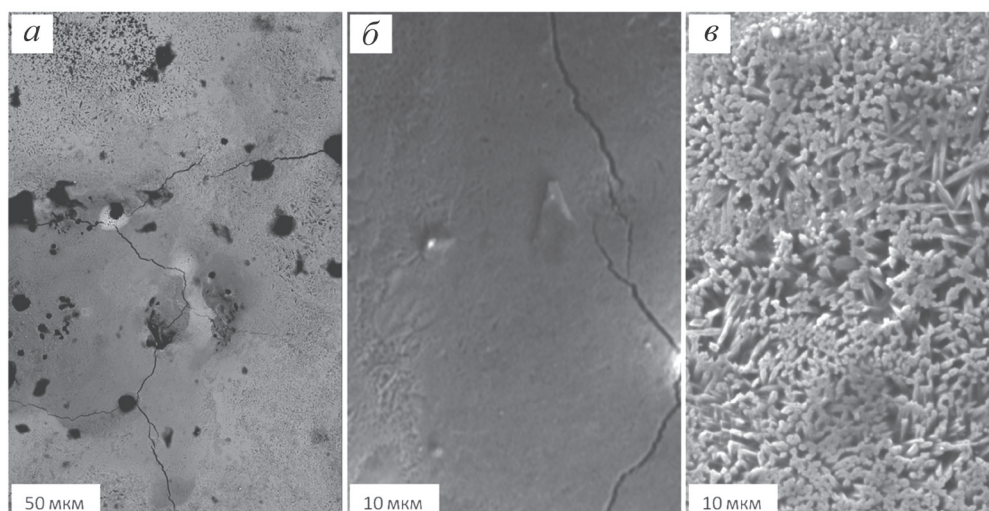


Рис. 2. Поверхность титанового сплава ВТ6, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей электронно-пучковой обработке ($E_s = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$)

элемента структуры, сформировавшихся исключительно в результате последующей обработки высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Первый – это области с игольчатой структурой (рис. 3, а).

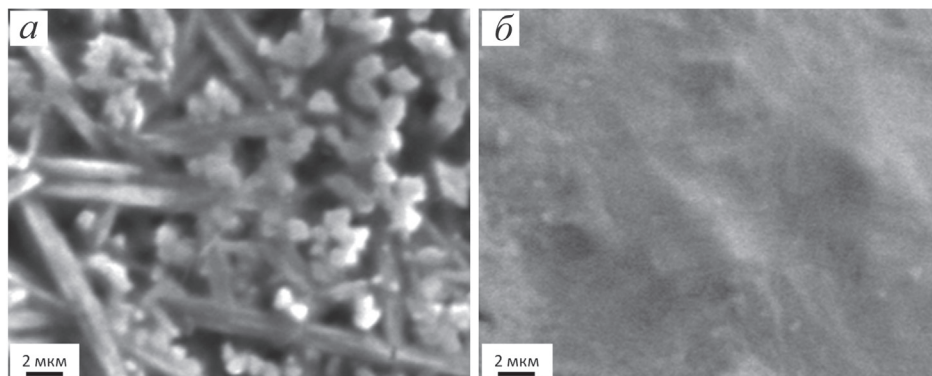


Рис. 3. Элементы структуры поверхности титанового сплава BT6 после ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$)

Продольные размеры игл изменяются в пределах до 10 мкм, поперечные – в пределах 1 мкм. Иглы располагаются преимущественно перпендикулярно поверхности облучения, т. е. по направлению теплоотвода. Вторым характерным элементом структуры поверхности облучения являются сравнительно гладкие области, размеры элементов которых изменяются в пределах 100 нм (рис. 3, б).

Области, представленные на рис. 2 и 3, различаются элементным составом. Результаты микрорентгеноспектрального анализа, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о том, что области, имеющие ярко выраженный темный контраст, сформированы исключительно легирующими элементами и кислородом (рис. 4, спектр 3). Они сформированы частицами исходного порошка, не растворившимися при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке.

Области с наноразмерной субструктурой сформированы исключительно атомами исходного материала с небольшой

добавкой углерода (рис. 4, спектр 1). Данные области предположительно содержат частица карбидной фазы.

Области с игольчатой структурой (рис. 4, спектр 2) содержат элементы легирующего порошка и сплава титана BT6. Они сформировались в результате жидкофазного легирования титана бором, углеродом и кислородом и должны иметь относительно сложный фазовый состав. Увеличение плотности энергии пучка электронов до $E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$ приводит к формированию преимущественно структуры игольчатого типа (рис. 5).

Микрорентгеноспектральный анализ областей с игольчатой структурой выявил присутствие легирующих элементов и элементов исходного сплава (рис. 6, спектр 1). Данный факт свидетельствует об увеличении степени растворения порошка карбида бора в титане с ростом плотности энергии пучка элек-

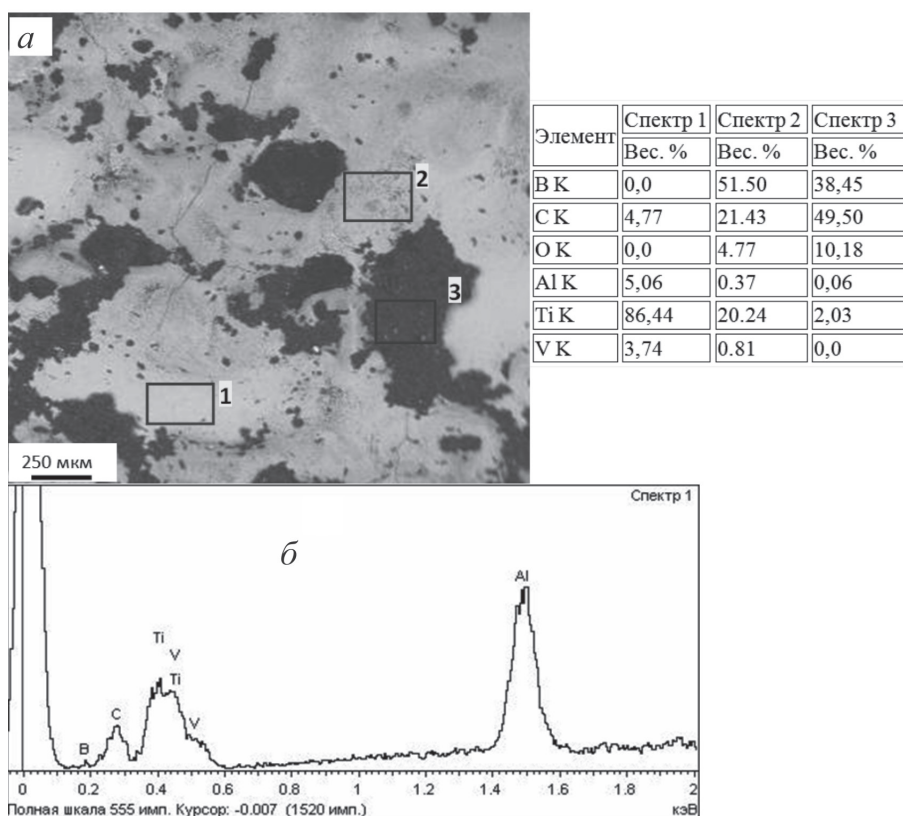


Рис. 4. Структура поверхности модификации сплава на основе титана BT6 после ЭВЛ и последующей ЭПО

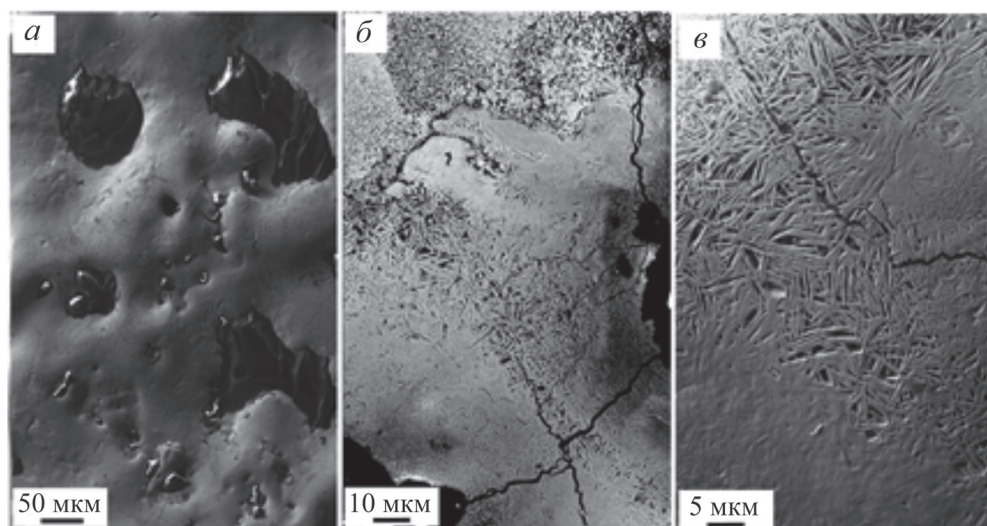


Рис. 5. Структура поверхности модификации сплава на основе титана BT6 после ЭВЛ и последующей ЭПО ($E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$)

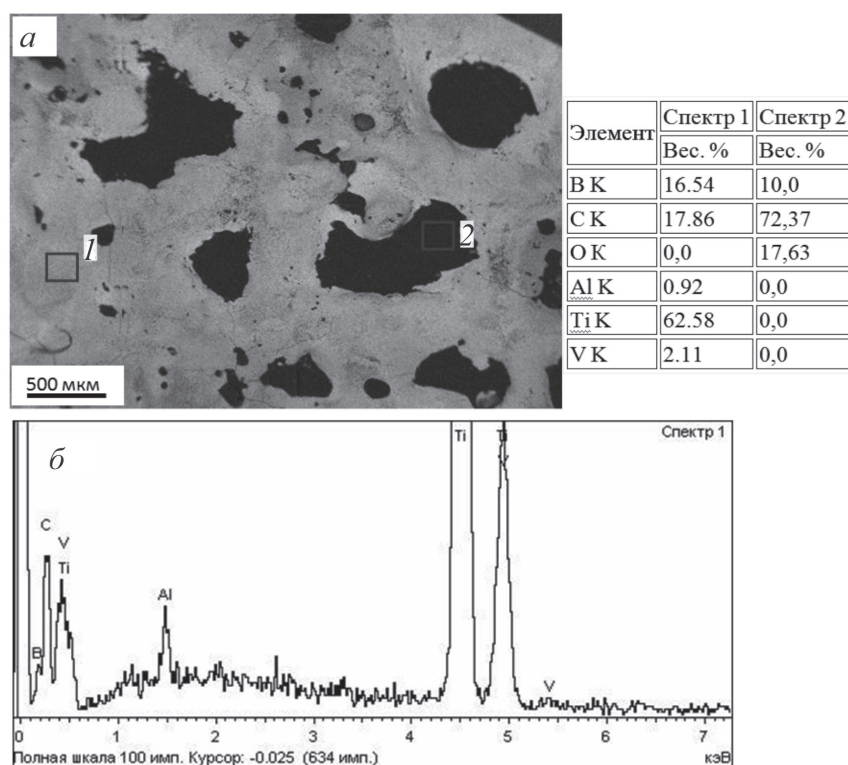


Рис. 6. Поверхность сплава на основе титана BT6, подвергнутого ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10 \text{ имп.}$)

тронов. Уровень гомогенности модифицируемого поверхностного слоя увеличивается.

Преобразование структуры объема поверхностного слоя анализировали, исследуя поперечные шлифы. Изображение структуры поперечного шлифа легированного слоя, обработанного электронным пучком при плотности энергии пуч-

ка электронов $E_s = 50 \text{ Дж/см}^2$, представлено на рис. 7. Дополнительная обработка электронным пучком при данной плотности энергии не приводит к формированию однородной структуры. Поверхностный слой толщиной до 30 мкм имеет игольчатое строение (рис. 7, б, в); субструктура нижележащего слоя подобна субструктуре, формирующейся в материале при электровзрывном легировании [1]. Следовательно, электронно-пучковая обработка при указанных параметрах позволяет модифицировать слой толщиной не более 30 мкм.

Структура обработанного слоя имеет слоистое строение. Это выявляется при исследовании шлифов в обратно отраженных электронах (рис. 7, а) и при микрорентгено-

спектральном анализе элементного состава материала. Обнаруживаются слои, обогащенные и обедненные легирующими элементами (рис. 8). Концентрация легирующих элементов слабо зависит от расстояния легированного слоя до поверхности облучения. В материале многослойной структуры формируются слои с повышенным уровнем легирования (упрочненные слои), которые чередуются со слоями с пониженным легированием (менее прочные слои).

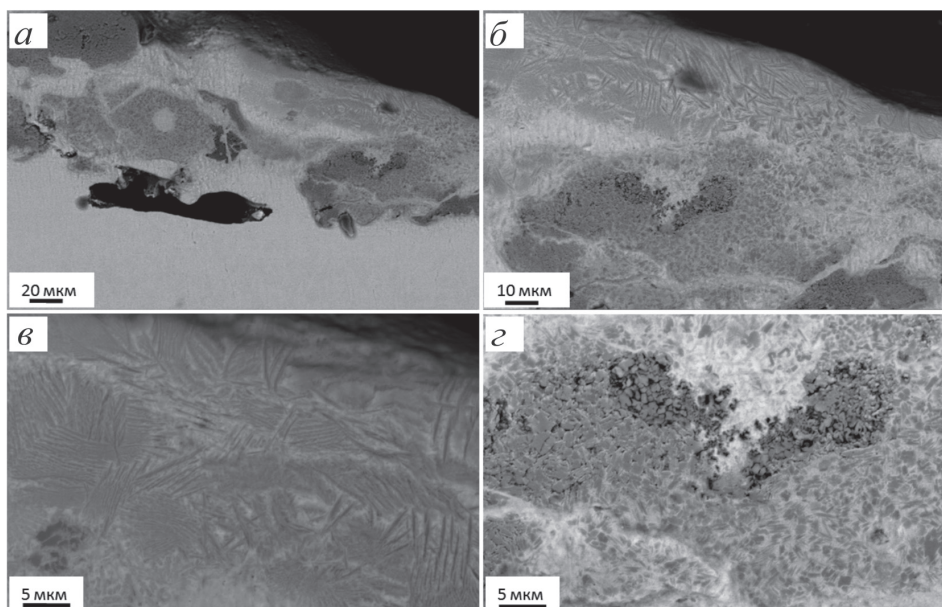
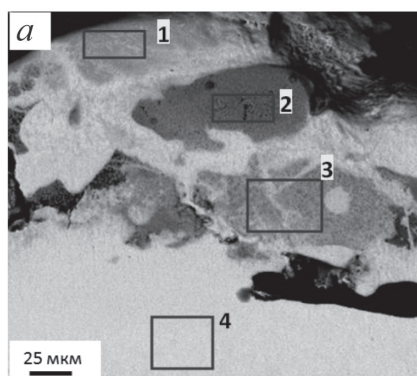


Рис. 7. Изображение структура поперечного шлифа, подвергнутого ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$; $N = 10 \text{ имп.}$)



Элемент	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3	Спектр 4
В К	Атомный%	Атомный%	Атомный%	Атомный%
В К	45,2	56,51	46,0	0,0
С К	14,2	21,35	16,62	4,82
Al K	0,75	0,62	3,05	10,53
Ti K	38,38	20,92	33,16	81,21
V К	1,48	0,6	1,17	3,44

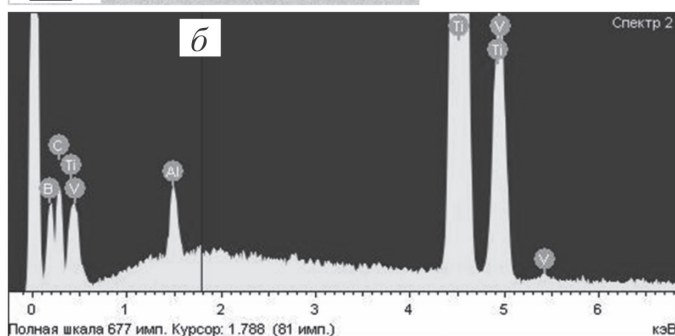


Рис. 8. Структура поперечного шлифа титанового сплава BT6 после ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 50 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$; $N = 10 \text{ имп.}$)

Подобная слоистая структура формируется в модифицированном слое при облучении материала высокоинтенсивным импульсным пучком электронов с параметрами $E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $N = 10 \text{ имп.}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$ (рис. 9).

В результате анализа изображений структуры поперечного шлифа, представленных на рис. 9,

выделили слои, различающиеся контрастом и субструктурой. Слои имеют меньшую толщину и большее количество по сравнению со слоями, формирующимися в модифицированном слое после облучения электронным пучком с плотностью энергии $E_s = 50 \text{ Дж/см}^2$ (рис. 7 и 8).

Распределение элементов, выявленное методами микро-рентгеноспектрального анализа, также однозначно свидетельствует в пользу слоистого строения поверхностного слоя, формирующегося при комбинированной обработке титана, сочетающей электровзрывное легирование порошком карбида бора и последующее облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Результаты микро-рентгено-спектрального анализа участков поверхности титанового сплава после комбинированной обработки приведены на рис. 10. Анализируя результаты, представленные в таблице к рис. 10, можно отметить, что слои, различающиеся контрастом, существенно отличаются концентрацией

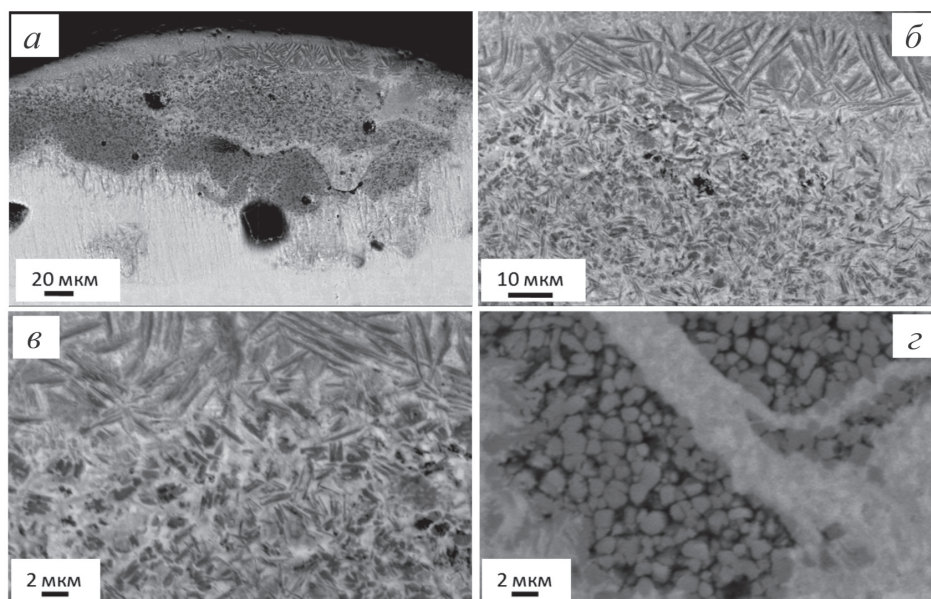


Рис. 9. Структура поперечного шлифа сплава титана ВТ6, подвергнутого ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$; $N = 10 \text{ имп.}$)

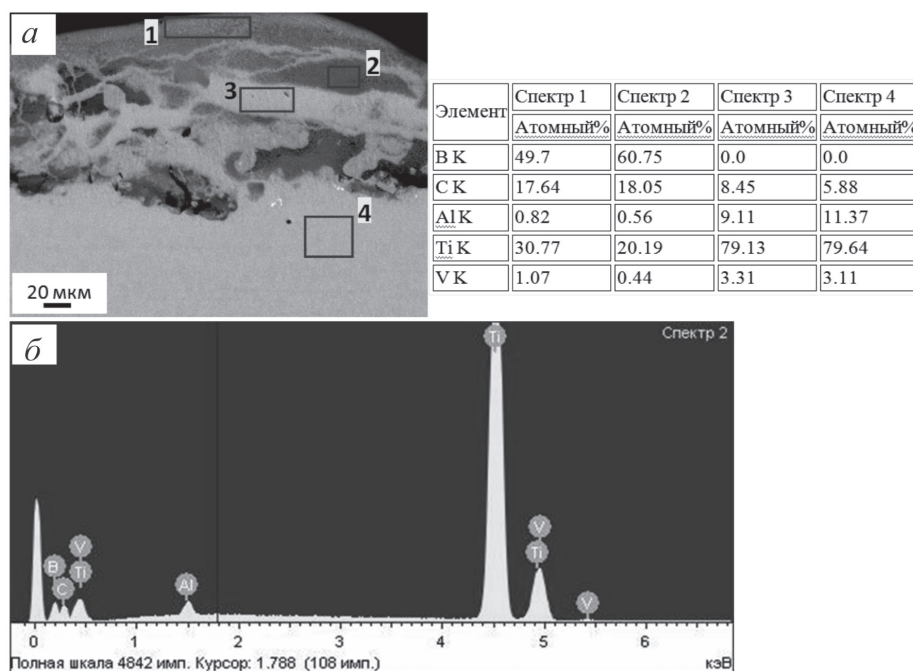


Рис. 10. Анализ структуры поперечного шлифа титанового сплава ВТ6 после ЭВЛ и ЭПО ($E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 100 \text{ мкс}$; $0,3 \text{ с}^{-1}$; $N = 10 \text{ имп.}$)

легирующих элементов. Последующая обработка легированного слоя высокоинтенсивным импульсным электронным пучком не приводит к гомогенизации этого слоя; формируется слоистая структура. Существенное различие в концентрации легирующих элементов в выявленных слоях приводит к различию их прочностных и трибологических свойств.

Выводы

Осуществлена комбинированная обработка поверхности титанового сплава ВТ6, заключающаяся в легировании плазмой, формирующейся при электрическом взрыве фольги титана с навеской порошка карбида бора, и последующем облучении высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Выявлено, что электровзрывное легирование поверхностного слоя образцов титанового сплава ВТ6 и его последующая электронно-пучковая обработка приводят к выглаживанию поверхности легирования и сопровождаются формированием многослойной структуры, характеризующейся чередованием слоев, обогащенных и обедненных легирующими элементами. Установлено, что сверхвысокие скорости охлаждения, инициированные импульсной обработкой электронным пучком, приводят к формированию структуры субмикронаномасштабного уровня, что позво-

ляет прогнозировать высокие прочностные и трибологические свойства обработанного материала.

Список литературы

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с. – ISBN 5-87623-027-8.
2. Research progress on laser surface modification of titanium alloys / Y.S. Tian, C.Z. Chen, S.T. Li, Q.H. Huo // *Applied Surface Science*. – 2005. – Vol. 242, iss. 1/2. – P. 177–184. – doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы: состав, структура, свойства: справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
4. Boyer R.R., Briggs R.D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2005. – Vol. 14, iss. 6. – P. 681–685. – doi: 10.1361/105994905X75448.
5. Полмеар Я., Джон Д. Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. – М.: Техносфера, 2008. – 468 с.
6. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с. – ISBN 978-5-8441-0263-9.
7. Полетика И.М. Крылова Т.А., Макаров С.А. Использование электронно-лучевой обработки для создания упрочняющих покрытий // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319, № 2. – С. 94–98.
8. Surface hardening alloy VT6 of electric explosion and by electron beam / Yu.F. Ivanov, T.Yu. Kobzareva,

S.V. Raikov, V.E. Gromov, N.A. Soskova, E.A. Budovskikh // *AIP Conference Proceedings*. – 2014. – Vol. 1623. – P. 217–220. – doi: 10.1063/1.4901482.

9. Формирование структурно-фазовых состояний и свойств поверхности титановых сплавов при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке / С.В. Райков [и др.]. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2014. – 267 с. – ISBN 978-5-905647-09-3.

10. Модифицирование структуры и свойств легких сплавов упрочняющими технологиями / под. ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова. – Новокузнецк: Полиграфист, 2015. – 226 с. – ISBN 978-5-91797-202-2.

11. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // *Известия вузов. Физика*. – 2008. – Т. 51, № 5. – С. 60–70.

12. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. – 1st ed. – Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2005. – 576 p. – ISBN 978-0-7506-6079-2.

13. Microstructure transformations of laser surface melted near alpha titanium alloy / G. Luo, G. Wu, Z. Huang, Z. Ruan // *Materials Characterization*. – 2009. – Vol. 60, iss. 6. – P. 525–529. – doi: 10.1016/j.matchar.2008.12.009.

14. Астанчик С.А., Голубев В.С., Маслаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. – Минск: Беларуская навука, 2008. – 251 с. – ISBN 978-985-08-0920-9.

15. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с. – ISBN 5-94836-018-0.

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 102–112

Surface hardening alloy VT6 of electroexplosion alloying with boron carbide and by electron beam treatment

Kobzareva T.Yu.¹, Ph.D. student, e-mail: kobzarevatanya@mail.ru

Gromov V.E.¹, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Ivanov Yu.F.², D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: yufi55@mail.ru

Konovalov S.V.¹, D.Sc (Engineering), Professor, e-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru

Budovskikh E.A.¹, D.Sc (Engineering), Professor, e-mail: oskolkova@kuz.ru

Bataev V.A.³, D.Sc (Engineering), Professor, e-mail: vabataev@yandex.ru

¹ Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Investigations aimed at identifying the changes in the surface layer of titanium alloy VT6 after combined treatment are carried out. Combined surface treatment of titanium alloy VT6 includes alloying with plasma formed during electrical explosion of titanium foil with a powder weight quantity of boron carbide and subsequent irradiation by high-intensity pulse electronic beam of sub millisecond exposure time. The titanium foil is used as exploded conductor during electroexplosive alloying. A weight quantity of boron carbide powder is placed into explosion area over the titanium foil. The laboratory electroexplosive device EVU 60/10 is used for EEA (electroexplosive alloying). The main parameters for a pulse liquid-phase alloying are set by the value of the charging voltage of the energy storage device of the accelerator, the diameter of the nozzle channel and the distance from its section to the sample. Subsequent thermal treatment of the titanium alloy VT6 surface layer is performed with high-intensity pulse electronic beam at the SOLO device (Institute of High Current Electronics SB RAS).

The study found that electroexplosive alloying of the surface layer of titanium alloy VT6 samples leads to the formation of the highly developed relief. In the surface layer a heterogeneous distribution of alloying elements is observed through the methods of electron scanning microscopy. A significant difference in its concentration in the revealed layers leads to the difference in its strength and tribological properties. The subsequent electron beam treatment of the alloyed surface leads to its smoothing. The formation of the multilayer structure occurs and the distribution of alloying elements in the surface layer becomes more uniform. Analysis of the treated surface irradiated by the electron beam revealed the presence of two characteristic elements of the structure, formed in the result of the subsequent treatment with high-intensity pulse electron beam. The first structure element is acicular structure areas with the needle size of 1-10 microns. Studies of the transverse sections of the titanium alloy after combined treatment allowed to determine the thickness of the modified layer, which is not more than 30 μm . So, we can conclude that electroexplosive alloying and fast cooling at pulse treatment lead to the formation of a structure of submicro-nanoscale level that can improve the strength and tribological properties of the treated surface.

Keywords:

titanium, boron carbide, electric explosion alloying electron-beam treatment, structural-phase states.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-102-112

References

1. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i spлавov* [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. 3rd ed. Moscow, MISIS Publ., 1999. 416 p. ISBN 5-87623-027-8
2. Tian Y.S., Chen C.Z., Li S.T., Huo Q.H. Research progress on laser surface modification of titanium alloys. *Applied Surface Science*, 2005, vol. 242, iss. 1–2, pp. 177–184. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011
3. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. *Titanovye splavy: sostav, struktura, svoistva. Spravochnik* [Titanium alloys: composition, structure, properties. Reference book]. Moscow, VILS-MATI Publ., 2009. 520 p.
4. Boyer R.R., Briggs R.D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2005, vol. 14, iss. 6, pp. 681–685. doi: 10.1361/105994905X75448
5. Polmear I., John D. *Light alloys. From traditional alloys to nanocrystals*. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2005. 416 p. ISBN 978-0-7506-6371-7 (Russ. ed.: Polmear Ya., Dzhon D. *Legkie splavy: ot traditsionnykh do nanokristallov*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 463 p. ISBN 978-5-94836-174-1).
6. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy elektrovzryvnogo legirovaniya metallov i spлавov* [Physical bases electroexplosive alloying metals and alloys]. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2007. 301 p. ISBN 978-5-8441-0263-9
7. Poletika I.M., Krylova T.A., Makarov S.A. Ispol'zovanie elektronno-luchevoi obrabotki dlya sozdaniya uprochnyayushchikh pokrytii [Use electron-beam processing to create a hardening coatings]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 2, pp. 94–98. (In Russian)
8. Ivanov Yu.F., Kobzareva T.Yu., Raikov S.V., Gromov V.E., Soskova N.A., Budovskikh E.A. Surface hardening alloy VT6 of electric explosion and by electron beam. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1623, pp. 217–220. doi: 10.1063/1.4901482
9. Raikov S.V., et al. *Formirovanie strukturno-fazovykh sostoyanii i svoistv poverkhnosti titanovykh spлавov pri elektrovzryvnom legirovanii i posleduyushchei elektronno-puchkovoi obrabotke* [Formation of structurally-

phase states and the surface properties of titanium alloys at electroexplosive doping and subsequent electron-beam processing]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2014. 267 p. ISBN 978-5-905647-09-3

10. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., eds. *Modifitsirovanie struktury i svoistv legkikh splavov uprochnyayushchimi tekhnologiyami* [Modification of structure and properties of light alloys with hardening technologies]. Novokuznetsk, Poligrafist Publ., 2015. 226 p. ISBN 978-5-91797-202-2

11. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostrukturirovanie poverkhnosti metallokeramicheskikh i keramicheskikh materialov pri impul'snoi elektronno-puchkovoi obrabotke [Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51, no. 5, pp. 60–70. (In Russian)

12. Ion J.C. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. 1st ed. Oxford, Elsevier Butterworth Heinemann, 2005. 576 p. ISBN 978-0-7506-6079-2

13. Luo G.X., Wu G.Q., Huang Z., Ruan Z.J. Microstructure transformations of laser surface melted near alpha titanium alloy. *Materials Characterization*, 2009, vol. 60, iss. 6, pp. 525–529. doi: 10.1016/j.matchar.2008.12.009

14. Astapchik S.A., Golubev V.S., Maslakov A.G. *Lazernye tekhnologii v mashinostroenii i metalloobrabotke* [Laser technologies in mechanical engineering and metal working]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2008. 251 p. ISBN 978-985-08-0920-9

15. Brandon D.G., Kaplan W.D. *Microstructural characterization of materials*. 1st ed. New York, John Wiley, 1999. 409 p. ISBN 0-471-98502-3 (Russ. ed.: Brandon D., Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 384 p. ISBN 5-94836-018-0).

Funding

The study was supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR projects 15-08 -03411a), and Ministry of Education and Science of Russia (projects № 2708 and № 3.1496.2014/K).

Article history:

Received 25 September 2015

Revised 23 October 2015

Accepted 15 November 2015