

МИКРОСТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО КАРБОБОРИРОВАНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Е. С. Ващук¹, К. В. Аксенова², Л. П. Башенко², Е. А. Будовских², В. Е. Громов²

¹Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в городе Прокопьевск (Россия, 653039, Кемеровская обл. – Кузбасс, Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Анализ структуры образцов сплава VT6 показал, что при электровзрывном карбоборировании формируется зона упрочнения толщиной до 50 мкм с высокоразвитым рельефом. Это слой неоднородный по толщине, элементному составу и структурно-фазовому состоянию. Последующая электронно-пучковая обработка приводит к уменьшению шероховатости поверхности и к более однородному распределению легирующих элементов. Толщина зоны упрочнения увеличивается до 60 мкм.

Ключевые слова: титановый сплав, электровзрывное карбоборирование, электронно-пучковая обработка, микроструктура

Для цитирования. Ващук Е.С., Аксенова К.В., Башенко Л.П., Будовских Е.А., Громов В.Е. Микроструктура поверхности титанового сплава VT6 после электровзрывного карбоборирования и последующей электронно-пучковой обработки // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2021. № 3 (37). С. 3 – 12.

MICROSTRUCTURE OF THE SURFACE OF THE TITANIUM ALLOY VT6 AFTER ELECTROEXPLOSIVE CARBOBORIZATION AND SUBSEQUENT ELECTRON BEAM TREATMENT

E. S. Vashchuk¹, K. V. Aksenova², L. P. Bashchenko², E. A. Budovskikh², V. E. Gromov²

¹Branch of the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev in Prokopyevsk (19a, Nogradskaya Str., Prokopyevsk, Kemerovo Region – Kuzbass 653039, Russian Federation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. Analysis of the structure of VT6 alloy samples after electroexplosive carboborization showed the formation of a hardening zone with a highly developed relief up to 50 microns thick, heterogeneous in thickness, elemental composition and structural-phase state. Subsequent electron-beam processing leads to a decrease in surface roughness and a more uniform distribution of alloying elements. The thickness of the hardening zone increases to 60 microns.

Keywords: titanium alloy, electro-explosive carboborization, electron beam processing, microstructure

For citation: Vashchuk E.S., Aksenova K.V., Bashchenko L.P., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Microstructure of the surface of titanium alloy VT6 after electroexplosive carboboration and subsequent electron beam treatment. *Bulletin of SibSIU*. 2021, no. 3 (37), p. 3–12. (In Russ.).

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются методы поверхностного упрочнения, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, таких как электровзрывное легирование (ЭВЛ) и обработка поверхности низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками – электронно-пучковая обработка (ЭПО). Такие методы позволяют проводить локальное упрочнение поверхности в местах наибольшего разрушения при эксплуатации и улучшать функциональные свойства (увеличивать показатели в несколько раз). В этой связи установление закономерностей формирования структурно-фазовых состояний и природы повышения эксплуатационных свойств поверхностей при упрочняющих обработках является актуальной научной задачей.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования был использован сплав на основе титана ВТ6. Химический состав сплава соответствовал ГОСТ 19807 – 91 (3,5 – 5,3 % V; 5,3 – 6,8 % Al; до 0,6 % Fe; до 0,1 % C; до 0,05 % N; до 0,3 % Zr; до 0,2 % O; до 0,015 % H; 0,3 % прочих примесей; остальное титан (по массе)).

Модифицирование поверхностного слоя сплава ВТ6 осуществляли методом электровзрывного легирования [1 – 3]. В качестве взрывающего проводника использовали фольгу титана толщиной 100 мкм. В область взрыва на титановую фольгу помещали навески порошка карбида бора В₄С (масса навески порошка 496 мг).

Для электровзрывного легирования использовали модифицированную лабораторную электровзрывную установку типа ЭВУ 60/10 (СибГИУ) (энергоемкость 60 кДж; собственная частота разряда 10 кГц; максимальный заряд 5 кВ; максимальная производительность 10 цикл/ч; средняя потребляемая мощность 0,55 кВт) с характерными значениями поглощаемой плотности мощности при обработке поверхности материала $\sim 10^9$ Вт/м², давления в ударно-сжатом слое плазмы вблизи облучаемой поверхности 10^6 – 10^7 Па, времени обработки примерно 100 мкс, толщины зоны легирования в ее центральной области 20 – 40 мкм [1, 2]. Условия для осуществления импульсного жидкофазного легирования задавали величиной зарядного напряжения накопителя энергии ускорителя, диаметром канала сопла и расстоянием от его среза до образца.

Покрyтия наносили на образцы титана марки ВТ6 диаметром 15 мм и высотой 5 мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали путем выбора зарядного

напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности. Поглощаемая облучаемой поверхностью плотность мощности при напылении составляла 5,5 ГВт/м², значение заряда 2,2 кВ. Диаметр титанового сопла разрядной камеры плазменного ускорителя 20 мм, расстояние образца от среза сопла 20 мм.

Дополнительную термическую обработку модифицированного таким образом поверхностного слоя осуществляли высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО», ИСЭ СО РАН) [4, 5]. Облучение электронным пучком проводили при следующих параметрах работы источника электронов: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 50 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов 100 мкс; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; количество импульсов облучения 10.

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

Результаты и их обсуждение

Характерные изображения структуры поверхности, формирующейся при электровзрывном легировании сплава титана ВТ6, демонстрирующие высокоразвитый рельеф, представлены на рис. 1. Масштаб элементов структуры поверхности легирования изменяется в очень широком интервале: от сотен микрометров (рис. 1, а) до десятков-сотен нанометров (рис. 1, б, в).

Таким же неоднородным является и распределение легирующих элементов в модифицируемом слое. На качественном уровне этот факт выявляется при исследовании поверхности легированного материала в обратно отраженных электронах. Выявляемый (рис. 2, а) черно-белый контраст свидетельствует о формировании областей, обогащенных относительно тяжелым элементом (титан) и относительно легкими элементами (углерод и бор). Методами микрорентгеноспектрального анализа различие элементного состава областей поверхности легирования можно охарактеризовать на количественном уровне. Анализируя результаты, представленные в таблице рис. 2, можно отметить, что коэффициент неоднородности в распределении легирующих элементов в поверхностном слое (отношение суммарного количества бора, углерода и кислорода в светлых и темных областях) достигает 2,8. Таким образом, электровзрывное легирование титана порошком карбида бора приводит к формированию в поверхностном слое объемов,

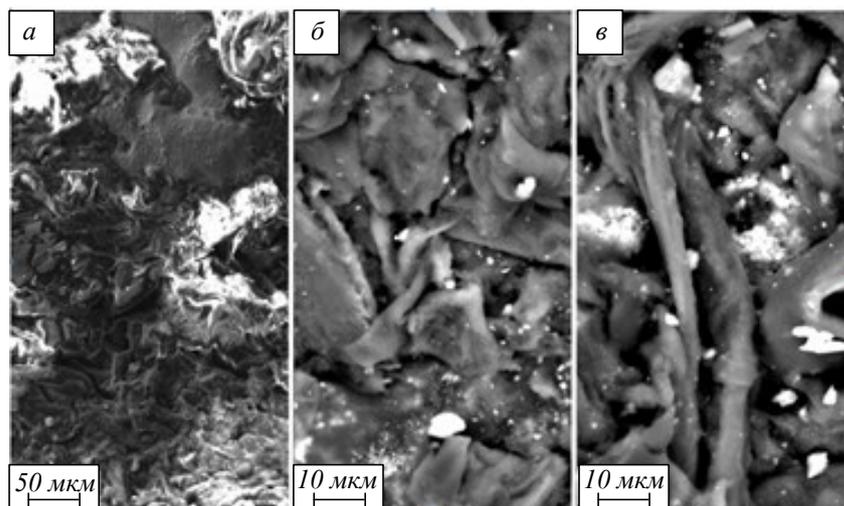
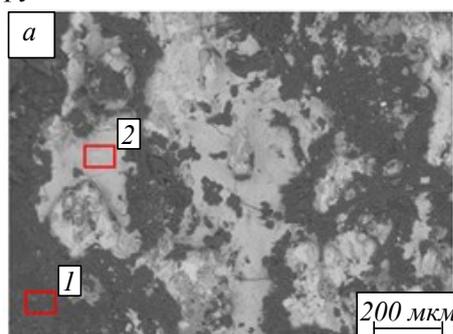


Рис. 1. Структура поверхности модификации сплава на основе титана VT6, подвергнутого электровзрывному легированию
 Fig. 1. Surface structure of the modification of an alloy based on titanium VT6 subjected to electroexplosive alloying

концентрация легирующих элементов в которых различается более чем в 2,5 раза.

Высокий уровень неоднородности структуры модифицированного слоя по толщине и по распределению легирующих элементов более

наглядно выявляется при исследовании строения поперечных шлифов. Вследствие высоко-развитого рельефа поверхности общая толщина легированного слоя изменяется в пределах от 10 до 50 мкм (рис. 3).



| Элемент | Количество, % (ат.), в спектре | |
|---------|-----------------------------------|-------|
| | 1 | 2 |
| B | 7,51 | 5,03 |
| C | 73,87 | 7,97 |
| O | 18,55 | 22,99 |
| Ti | 0,07 | 59,29 |
| Al | 0 | 2,82 |
| V | 0 | 1,90 |

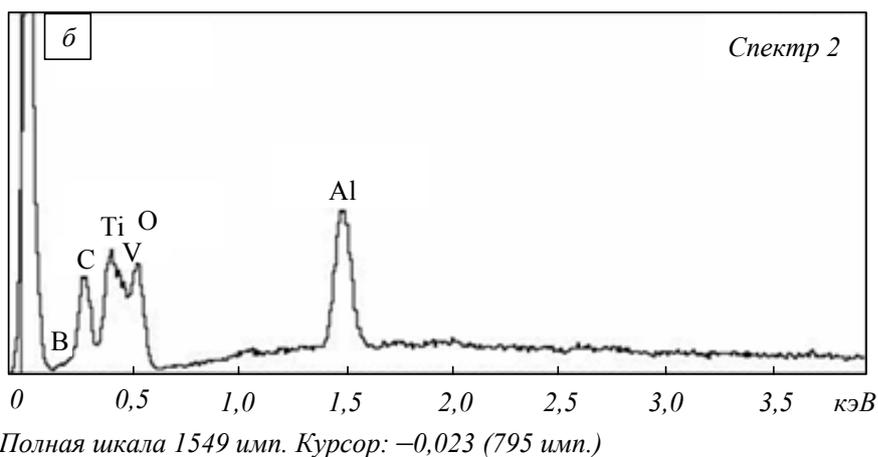


Рис. 2. Структура поверхности (а) модификации сплава на основе титана VT6, подвергнутого электровзрывному легированию и энергетический спектр (б), полученный с участка № 2. В таблице приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа участков, указанных на поз. (а)

Fig. 2. Surface structure (a) of the modification of the VT6 titanium-based alloy subjected to electroexplosive alloying and the energy spectrum (b) obtained from site No. 2. The table shows the results of the microrentgenospectral analysis of the sites indicated in pos. (a)

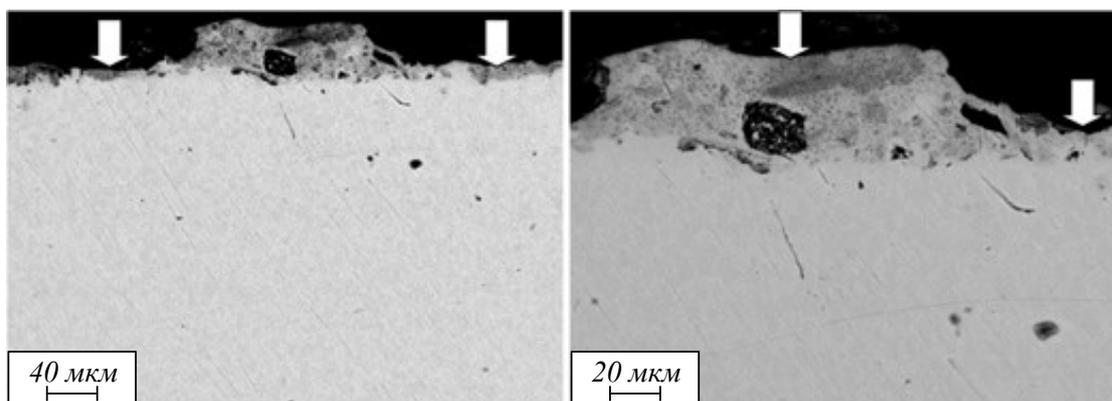


Рис. 3. Структура модифицированного слоя образца титанового сплава VT6, подвергнутого электровзрывному легированию порошком карбида бора (стрелками указана поверхность модифицирования)
 Fig. 3. Structure of the modified layer of a sample of titanium alloy VT6 subjected to electroexplosive alloying with boron carbide powder (arrows indicate the surface of modification)

По морфологическому признаку (степени травимости) в легированном объеме можно выделить минимум четыре слоя: поверхностный (рис. 4, слой 1), промежуточный (рис. 4, слой 2), переходный (рис. 4, слой 3) и слой термического влияния, плавно переходящий в основной объем образца.

Следует отметить, что различие в степени травимости наблюдается не только между слоями, но и в пределах каждого слоя (рис. 4, б). Вы-

явленные слои характеризуются определенной субструктурой, размеры элементов которой изменяются в пределах 1 мкм (рис. 4, в, г).

Разный уровень травимости указанных слоев свидетельствует об их различии в фазовом и элементном составе. Элементный состав слоев изучали методами микрорентгеноспектрального анализа. Пример анализа элементного состава легированного слоя представлен на рис. 5.

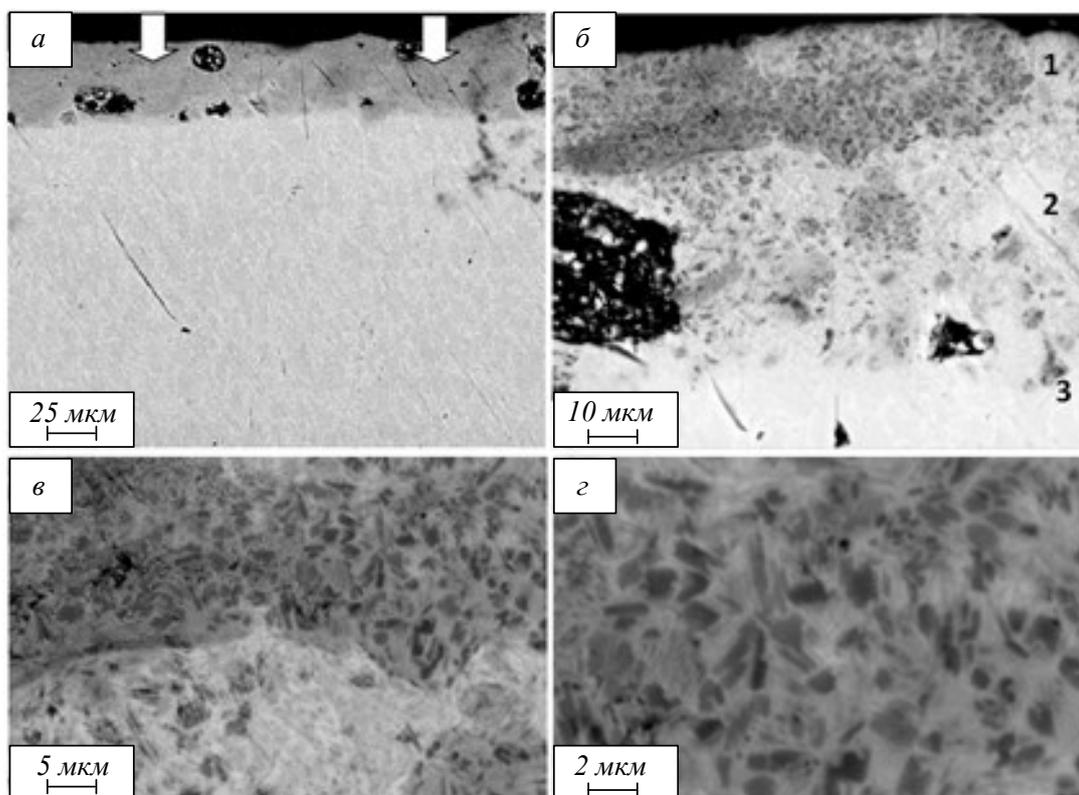
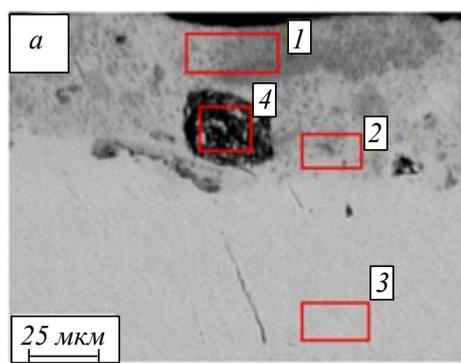


Рис. 4. Структура поперечного шлифа сплава на основе титана VT6, подвергнутого электровзрывному легированию. Поверхность легирования указана на поз. (а) стрелками. Цифрами 1 – 3 на поз. (б) обозначены поверхностный, промежуточный и переходный слои

Fig. 4. The structure of the transverse section of the VT6 titanium-based alloy subjected to electroexplosive alloying. The alloying surface is indicated in pos. (a) arrows. Numbers 1 – 3 on pos. (б) the surface, intermediate and transition layers are indicated



| Элемент | Количество, % (ат.), в спектре | | | |
|---------|--------------------------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| B | 40,75 | 10,28 | 0 | 0 |
| C | 13,22 | 10,42 | 4,77 | 49,93 |
| O | 0 | 0 | 0 | 24,29 |
| Si | 0 | 0 | 0 | 5,30 |
| Al | 3,62 | 5,10 | 9,97 | 1,61 |
| Ti | 40,85 | 55,12 | 82,24 | 17,88 |
| V | 1,55 | 1,99 | 3,02 | 0,75 |

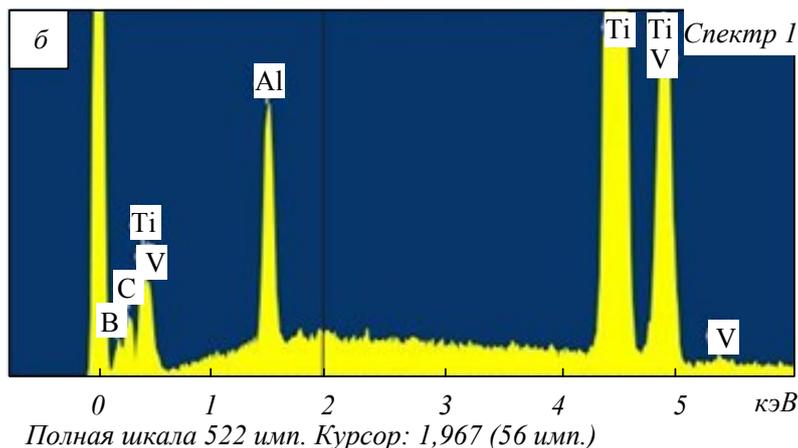


Рис. 5. Структура (а) поперечного шлифа сплава на основе титана ВТ6, подвергнутого электровзрывному легированию, и энергетический спектр (б), полученный с участка № 1. В таблице приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа участков, указанных на поз. (а)

Fig. 5. The structure (a) of the transverse section of the VT6 titanium-based alloy subjected to electroexplosive alloying and the energy spectrum (b) obtained from site No. 1. The table shows the results of microrentgenospectral analysis of the sites indicated in pos. (a)

Анализируя результаты, представленные в таблице к рис. 5, можно выявить определенную закономерность в расположении легирующих элементов (углерод и бор). А именно, с увеличением расстояния от поверхности легирования (спектры 1 – 3) концентрации атомов бора и углерода снижаются. В отдельных случаях в легированном слое обнаруживаются области округлой формы (рис. 5, участок 4), существенно отличающиеся от окружающего объема материала структурой и элементным составом. Основными элементами данных областей являются углерод, кислород и кремний (рис. 5, таблица, спектр 4). Можно предположить, что данные области сформировались в процессе механической шлифовки модифицированного электровзрывным методом материала в результате внедрения в поверхность шлифа частиц шлифовальной пасты и последующего травления приготовленного шлифа.

Характерной особенностью электровзрывного легирования является высокоразвитый рельеф модифицируемой поверхности материала (рис. 6).

Выявляемый методами сканирующей электронной микроскопии контраст свидетельствует

о неоднородном распределении легирующих элементов в поверхностном слое образца [6]. А именно, объемы материала, обогащенные легкими элементами (углерод и бор), выглядят более темными по сравнению с объемами материала, обогащенными металлическими атомами, имеющимися в составе исследуемого сплава.

Последующее облучение модифицированной поверхности высокоинтенсивным импульсным электронным пучком приводит к существенному преобразованию рельефа и распределению легирующих элементов в поверхностном слое. А именно, рельеф поверхности выглаживается; черно-белый контраст на изображении поверхности модифицирования замещается преимущественно серым (рис. 6, б). 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 не только к выглаживанию рельефа, но и к существенному преобразованию структуры материала.

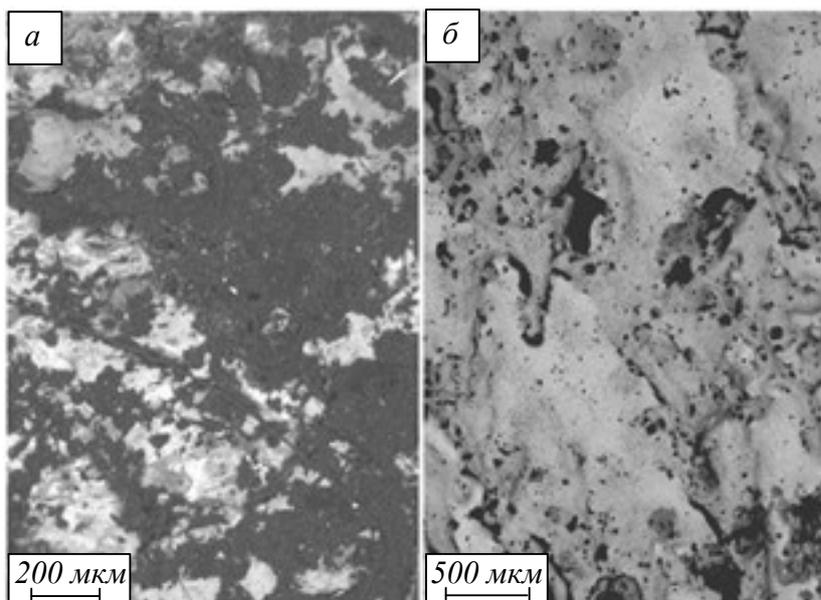


Рис. 6. Структура поверхности модификации сплава на основе титана ВТ6, подвергнутого электровзрывному легированию (а) и последующей обработке (б) высокоинтенсивным импульсным электронным пучком с параметрами: (плотность энергии пучка электронов 50 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов 100 мкс, количество импульсов облучения 10 имп.)

Fig. 6. Surface structure of a modification of a titanium VT6 alloy subjected to electroexplosive alloying (a) and subsequent processing (b) by a high-intensity pulsed electron beam with parameters: (electron beam energy density 50 J/cm²; electron beam pulse duration 100 microseconds, number of irradiation pulses 10 pulses)

Характерные изображения структуры слоя, формирующегося при дополнительной обработке модифицированного титана электронным пучком (с параметрами: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 50 Дж/см²; длительность импульса

воздействия пучка электронов 100 мкс; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; количество импульсов облучения 10) представлены на рис. 7. Анализ легированной поверхности, облученной электронным пучком, выявил два характерных элемента структуры, сформировавшихся исклю-

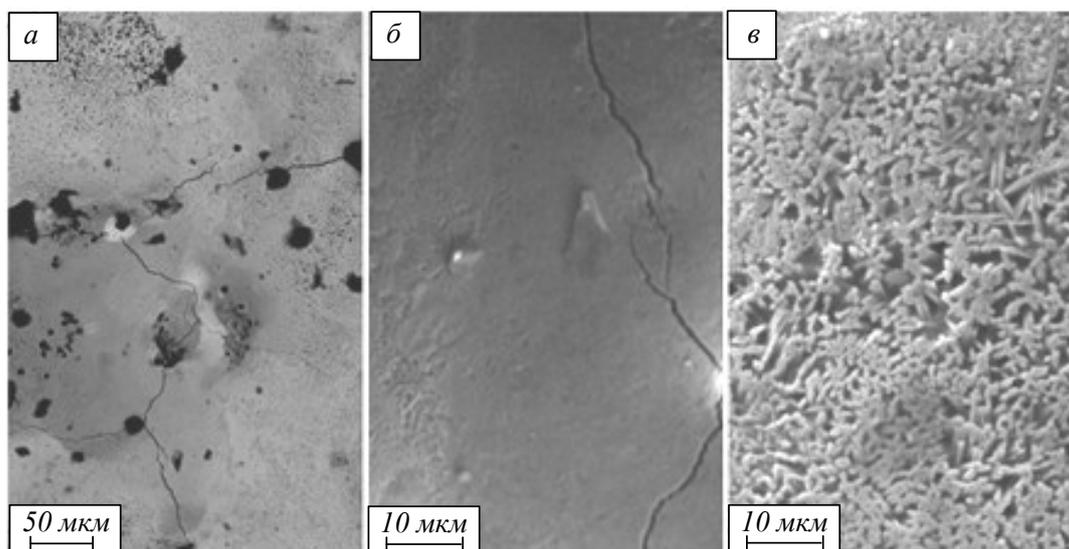


Рис. 7. Структура поверхности модификации сплава на основе титана ВТ6, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (плотность энергии пучка электронов 50 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов 100 мкс; количество импульсов облучения 10)

Fig. 7. Surface structure of a modification of a titanium VT6 alloy subjected to electroexplosive alloying and subsequent treatment with a high-intensity pulsed electron beam (electron beam energy density 50 J/cm²; the pulse duration of the electron beam exposure is 100 microseconds; the number of irradiation pulses is 10)

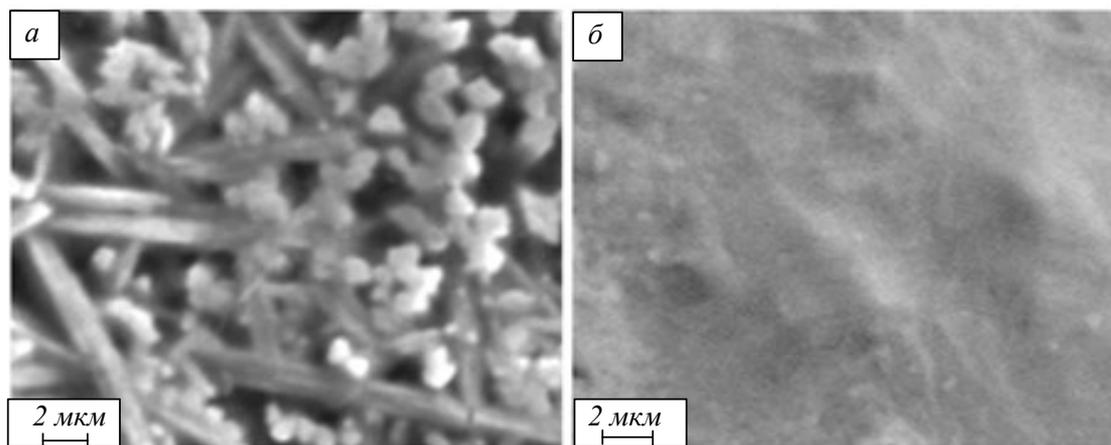


Рис. 8. Структура поверхности модификации сплава на основе титана VT6, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 50 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов 100 мкс; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; количество импульсов облучения 10)

Fig. 8. The structure of the surface modification of the alloy based on titanium VT6 subjected to electroexplosive alloying and the subsequent processing of high-intensity pulsed electron beam (the energy of the accelerated electrons 18 keV; energy density of the electron beam of 50 j/cm²; pulse duration of exposure of the electron beam 100 μs; of the pulse repetition rate of 0.3 s⁻¹; the number of pulses of radiation 10)

чительно в результате повторной обработки. А именно, области с игольчатой структурой (рис. 8, а). Продольные размеры игл изменяются в пределах до 10 мкм, поперечные – в пределах до 1 мкм. Иглы располагаются преимущественно перпендикулярно поверхности облучения, то есть по направлению теплоотвода. Вторым характерным типом структуры поверхности облучения являются сравнительно гладкие области, размеры элементов которых изменяются в пределах 100 нм (рис. 8, б).

Представленные на рис. 7 и 8 области различаются элементным составом. Результаты микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о том, что области, имеющие ярко выраженный темный контраст, сформированы исключительно легирующими элементами и кислородом (рис. 9, спектр 3). Следовательно, можно предположить, что они сформированы частицами исходного порошка, не растворившимися при электровзрывном легировании и последующем облучении электронным пучком.

Области с наноразмерной субструктурой сформированы исключительно атомами исходного материала с небольшой добавкой углерода (рис. 9, спектр 1). Можно ожидать, что данные области содержат частицы карбидной фазы.

Области с игольчатой структурой (рис. 9, спектр 2) содержат элементы легирующего порошка и сплава титана VT6: следовательно, они были сформированы в результате жидкофазного легирования титана бором, углеродом и кислородом, то есть должны иметь относительно сложный фазовый состав.

Микрорентгеноспектральный анализ областей с игольчатой структурой выявил присутствие как легирующих элементов, так и элементов исходного сплава (рис. 9, спектр 1). Данный факт свидетельствует об увеличении степени растворения порошка карбида бора в титане с ростом плотности энергии пучка электронов, то есть об увеличении уровня гомогенности модифицируемого поверхностного слоя.

Преобразование структуры объема поверхностного слоя анализировали, исследуя травленные поперечные шлифы. На рис. 10 представлено характерное изображение структуры поперечного шлифа легированного слоя, обработанного электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 50 Дж/см². Отчетливо видно, что дополнительная обработка электронным пучком при данной плотности энергии не приводит к формированию однородной структуры. Поверхностный слой толщиной до 30 мкм имеет игольчатое строение (рис. 10, б, в); субструктура нижележащего слоя подобна субструктуре, формирующейся в материале при электровзрывном легировании. Следовательно, электронно-пучковая обработка при указанных параметрах позволяет модифицировать слой толщиной не более 30 мкм.

Выводы

Комплексное электровзрывное легирование поверхности титанового сплава VT6 с использованием карбида бора приводит к формированию зоны упрочнения толщиной до 50 мкм с высоко-развитым рельефом, неоднородного по толщине,

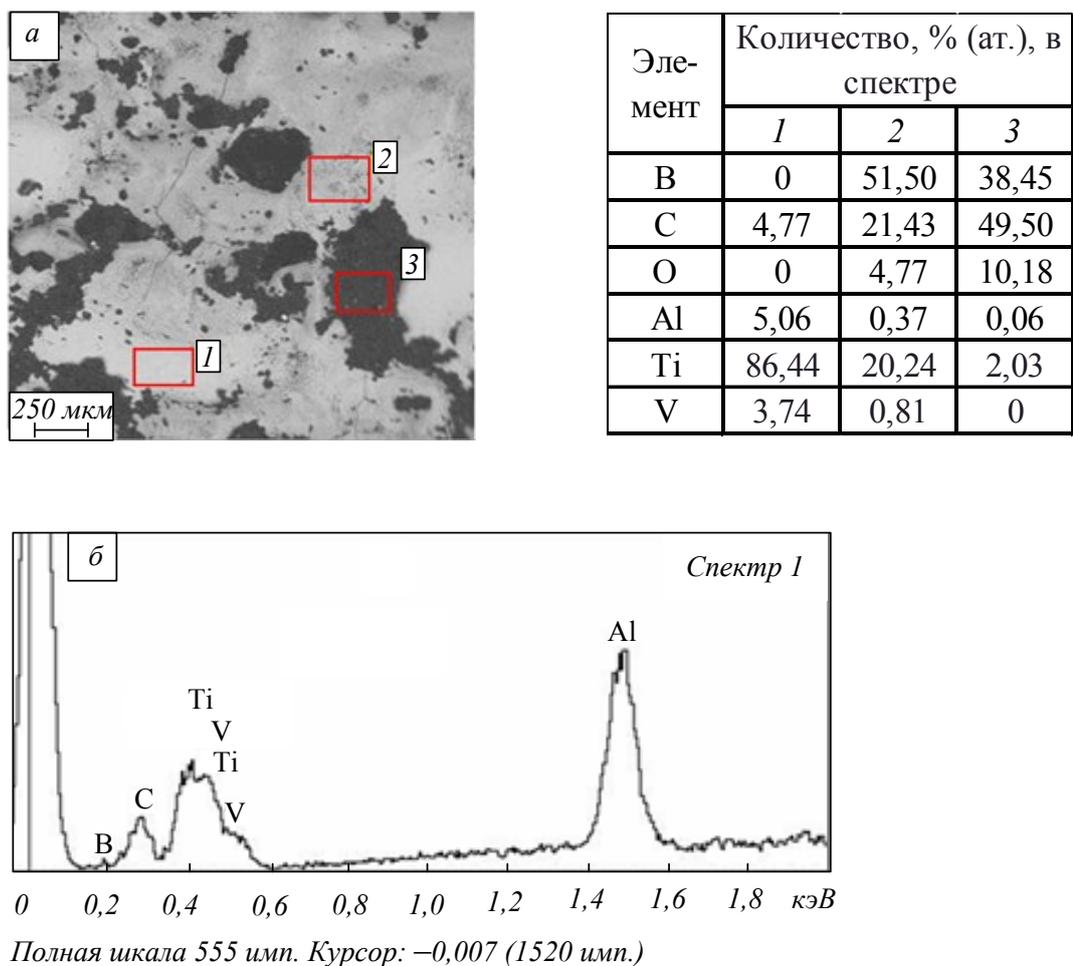


Рис. 9. Структура (а) поверхности модификации сплава на основе титана VT6, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (плотность энергии пучка электронов 50 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов 100 мкс; количество импульсов облучения 10) и энергетический спектр (б), полученный с участка № 1. В таблице приведены результаты микрорентгено-спектрального анализа участков, указанных на поз. (а)

Fig. 9. The structure of (a) surface modification of the alloy based on titanium VT6 subjected to electroexplosive alloying and the subsequent processing of high-intensity pulsed electron beam (energy density of the electron beam of 50 j/cm²; pulse duration of exposure of the electron beam 100 μs; number of pulses of radiation 10) and energy spectrum (b) obtained from site No. 1. The table shows the results of the microrentgenospectral analysis of the sites indicated in pos. (a)

элементному составу и структурно-фазовому состоянию. Электронно-пучковая обработка приводит к уменьшению шероховатости поверхности и более однородному распределению легирующих элементов. Толщина зоны упрочнения возрастает до 60 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. 304 с.
2. Формирование структурно-фазовых состояний и свойств поверхности титановых сплавов при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке / С.В. Райков, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Е.С. Ващук. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2014. 267 с.
3. Карпий С.В., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф. и др. Формирование поверхностных слоев титановых сплавов при электровзрывном легировании алюминием // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6. № 1. С. 46–48.
4. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Kononov. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd, 2015. 272 p.
5. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом усталостном нагружении в условиях низких и высоких температур. Киев: Наукова думка, 1978. 241 с.
6. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2006. 384 с.

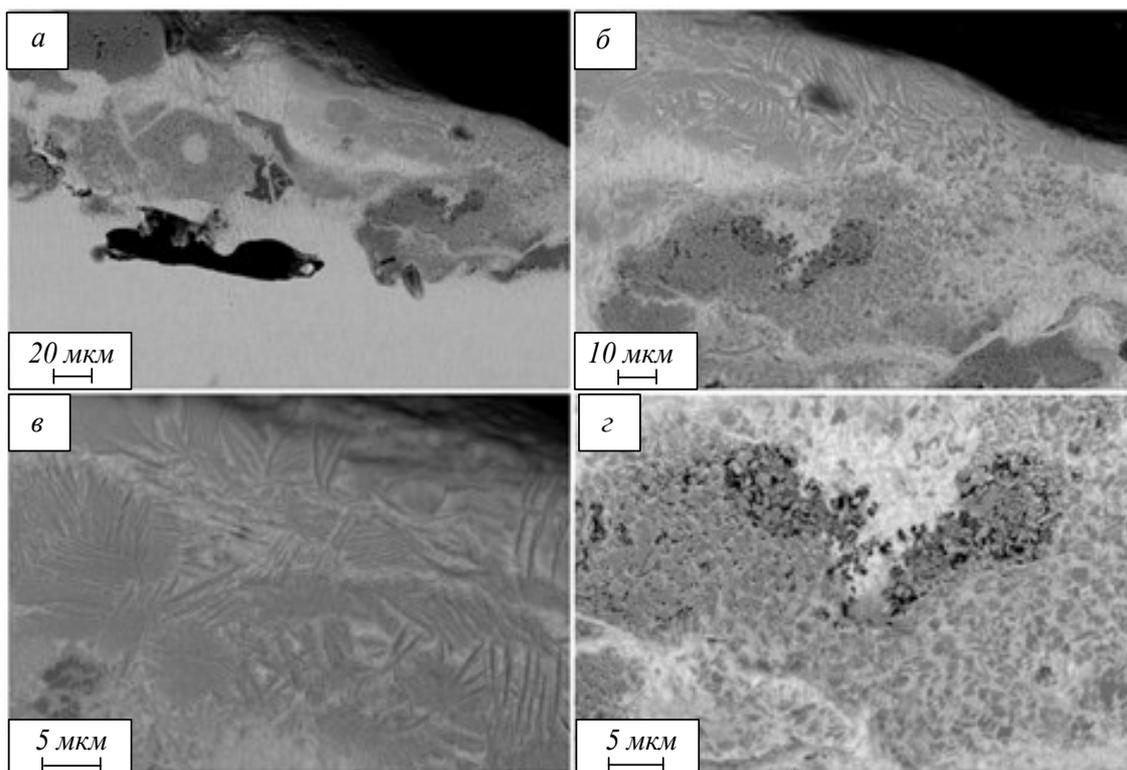


Рис. 10. Структура поперечного шлифа сплава на основе титана VT6, подвергнутого электровзрывному легированию и последующему облучению электронным пучком (энергия ускоренных электронов 16 кэВ; плотность энергии пучка электронов 50 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов 100 мкс; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; количество импульсов облучения 10)

Fig. 10. The structure of the transverse section of an alloy based on titanium VT6, subjected to electroexplosive alloying and subsequent irradiation with an electron beam (the energy of accelerated electrons is 16 keV; the energy density of the electron beam is 50 J/cm²; the pulse duration of the electron beam is 100 microseconds; the pulse repetition rate is 0.3 s⁻¹; the number of irradiation pulses is 10)

REFERENCES

1. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Physical bases of electroexplosive alloying of metals and alloys. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2007, 304 p. (In Russ.).
2. Raikov S.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vashchuk E.S. Formation of structural-phase states and surface properties of titanium alloys during electroexplosive alloying and subsequent electron beam processing. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2014, 267 p. (In Russ.).
3. Karpil S.V., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., etc. Formation of surface layers of titanium alloys during electroexplosive alloying with aluminum. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya*. 2009. vol. 6, no. 1, pp. 46–48. (In Russ.).
4. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V., Kononov S.V. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd, 2015, 272 p.
5. Strizhalo V.A. Cyclic strength and creep of metals under low-cycle fatigue loading at low and high temperatures. Kiev: Naukova dumka, 1978, 241 p. (In Russ.).
6. Brandon D., Kaplan U. Microstructure of materials. Methods of research and control. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 384 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Екатерина Степановна Ващук, кандидат технических наук, доцент кафедры естественных дисциплин, филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в городе Прокопьевск
ORCID: 0000-0002-1345-7419
E-mail: vaschuk@bk.ru

Кристина Владимировна Аксенова, кандидат технических наук, доцент кафедры естественных дисциплин, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-4908-6776
E-mail: 19krestik91@mail.ru

Людмила Петровна Бащенко, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1878-909X
E-mail: Luda.baschenko@gmail.com

Евгений Александрович Будовских, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: budovskikh@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Information about the authors

Ekaterina S. Vashchuk, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Natural Sciences, Branch of the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev in Prokopyevsk
ORCID: 0000-0002-1345-7419

Email: vashchuk@bk.ru

Krestina V. Aksenova, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Natural Sciences, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-4908-6776
Email: 19krestik91@mail.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1878-909X
Email: Luda.baschenko@gmail.com

Evgeny A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior Researcher of the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University,
Email: budovskikh@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Natural Sciences, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-5147-5343
Email: gromov@physics.sibsiu.ru

© 2021 г. Е.С. Ващук, К.В. Аксенова,
Л.П. Бащенко, Е.А. Будовских, В.Е. Громов
Поступила в редакцию 30.06.2021 г.