

АНАЛИЗ РАСТВОРЕНИЯ УГЛЕРОДА В ТИТАНЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ¹

**В.Е. Громов², С.В. Райков³, Д.А. Шерстобитов⁴, Ю.Ф. Иванов⁵
Б.Б. Хаимзон⁶, С.В. Коновалов⁷**

Методами сканирующей электронной микроскопии выполнен анализ структурно-фазового состояния поверхности титанового сплава ВТ6, подвергнутого электровзрывному легированию углеграфитовыми волокнами и последующей электронно-пучковой обработке. Рассмотрен процесс растворения углеграфитовых волокон на каждом этапе обработки. Проведено сравнение с результатами теоретических модельных представлений.

Ключевые слова: растворение углерода, титан, волокна, сканирующая электронная микроскопия.

Модификация поверхности материала концентрированными потоками энергии позволяет добиться значительного улучшения эксплуатационных свойств материала. Одним из перспективных методов поверхностной обработки материала является электровзрывное легирование (ЭВЛ) с последующей электронно-пучковой обработкой (ЭПО) [1]. Такая обработка обеспечивает значительное повышение твердости и износостойкости поверхности самых различных материалов. На первом этапе такой комбинированной обработки при науглероживании титана с использованием углеграфитовых волокон добиваются равномерного распределения углерода в матрице. На втором этапе с помощью ЭПО происходит растворение частиц углерода и образование однородного слоя карбида титана [2].

Накопленный значительный экспериментальный материал по модифицированию поверхностных свойств титана и его сплавов за счет ЭВЛ и ЭПО [1–4] требует адекватного теоретического описания. Были предложены модели формирования наноструктурных слоев [5], генерации термоупругих волн [6], растворения частиц углерода в титане [7] при воздействии концентрированных потоков энергии. В работе [8] рассмотрен вопрос о распределении углерода в карбиде титана и в жидком растворе титана с углеродом с учетом диаграммы состояний и изменения температуры за счет фазовых переходов и теплообмена с окружающей средой. Представленная модель и расчеты по ней позволили показать, что частицы углерода микрометрового (~10 мкм) диапазона растворяются за время порядка 10 с. Это время много больше времени воздействия на материал концентрированным потоком энергии. При размерах частиц порядка нанометра время растворения становится равным 10 мкс по порядку величины. В этом случае частица углерода успевает раствориться за время воздействия при электронно-пучковой обработке.

Полученные теоретические зависимости позволили сделать важный вывод, что в процессе комбинированной обработки следует использовать именно углеграфитовые волокна, диаметр микрофибрилл в которых порядка десятков нанометров, что позволит их растворять за время воздействия при электронно-пучковой обработке.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-02-91150-ГФЕН-а, № 11-02-12091-офи-м-2011) и госзадания Минобрнауки № 2 4807 2011

² Громов Виктор Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), Новокузнецк
E-mail: gromov@physics.sibsu.ru

³ Райков Сергей Валентинович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), Новокузнецк.

⁴ Шерстобитов Денис Александрович – младший научный сотрудник УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), Новокузнецк

⁵ Иванов Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
E-mail: yufi55@mail.ru

⁶ Хаимзон Борис Бернардович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физики и методики преподавания физики, Кузбасская государственная педагогическая академия (КузГПА)
E-mail: khaimzon@yandex.ru

⁷ Коновалов Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ)
E-mail: konovalov@physics.sibsu.ru

Предложенная физическая модель и математический расчет позволяют утверждать, что в нанометровом диапазоне размера ячейки неоднородности, формирующие гетерогенную структуру после ЭВЛ, полностью модифицируются с помощью ЭПО за счет увеличения времени охлаждения, обусловленного теплотой реакций и темпом внешнего охлаждения.

Целью настоящей работы является сопоставление результатов и выводов модельных представлений [8] с экспериментальными данными эволюции структурно-фазовых состояний поверхности титанового сплава ВТ6, обработанных плазмой электрического взрыва углеграфитового волокна (далее по тексту УГВ) и подвергнутых последующей ЭПО. Как и в [1–4] поглощаемая мощность при ЭВЛ составляла $5,5 \text{ ГВт/м}^2$, масса взрывааемых УГВ $\sim 70 \text{ мг}$. Параметры ЭПО: плотность энергии пучка электронов в импульсе – 45 Дж/см^2 , время воздействия – 100 мкс , число импульсов – 10 .

Исследования поверхности облучения, выполненные методами сканирующей электронной микроскопии [9, 10], выявили присутствие осколков УГВ (рис. 1). О том, что данные осколки сформированы углеродом, свидетельствуют изображения структуры, полученные в обратно отраженных электронах. На таких снимках области, обогащенные более легким элементом, имеют более темный контраст [10, 11] (рис. 1, б). По сравнению с титаном углерод имеет меньший атомный вес, поэтому выявленные стержневидные образования являются графитом – осколками УГВ.

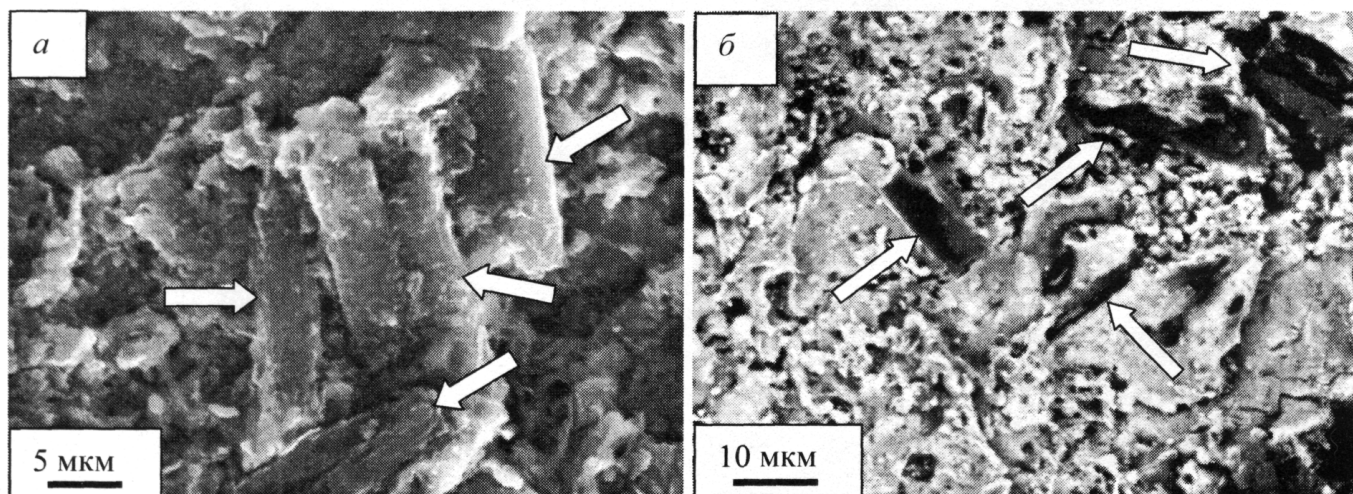


Рис. 1. Структура поверхности титанового сплава ВТ6, обработанного плазмой, формирующейся при электрическом взрыве углеграфитового волокна (указаны стрелками). Сканирующая электронная микроскопия; а) изображение получено во вторичных электронах, б) изображение получено в обратно отраженных электронах

Результаты статистического анализа поперечных размеров таких стержней приведены на рис. 2, а. Средние поперечные размеры стержней $3,25 \pm 1,05 \text{ мкм}$; реальные размеры стержней изменяются в пределах от $1,67 \text{ мкм}$ до $5,5 \text{ мкм}$.

Дополнительная ЭПО поверхности титанового сплава ВТ6, подвергнутого ЭВЛ, приводит к

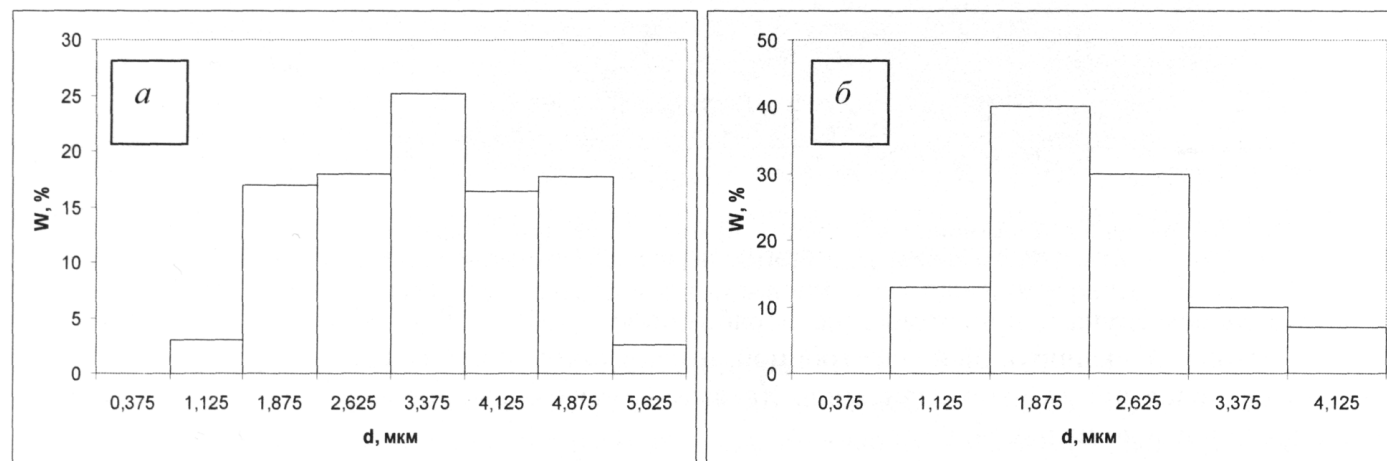


Рис. 2. Распределение по размерам (поперечные размеры) углеграфитовых волокон, выявленных в приповерхностном слое титанового сплава ВТ6; а) после электровзрывного легирования УГВ (дважды); б) после дополнительной ЭПО

практически полному растворению графитовых стержней в результате плавления поверхностного слоя. На поверхности формируется структура ячеистой и дендритной кристаллизации, характерное изображение которой приведено на рис. 3.

Эти результаты позволяют заключить, что ЭПО по указанному выше режиму поверхности титанового сплава ВТ6, сформировавшейся при ЭВЛ, сопровождается растворением углеродистых осколков, размерные характеристики которых приведены на рис. 2, а.

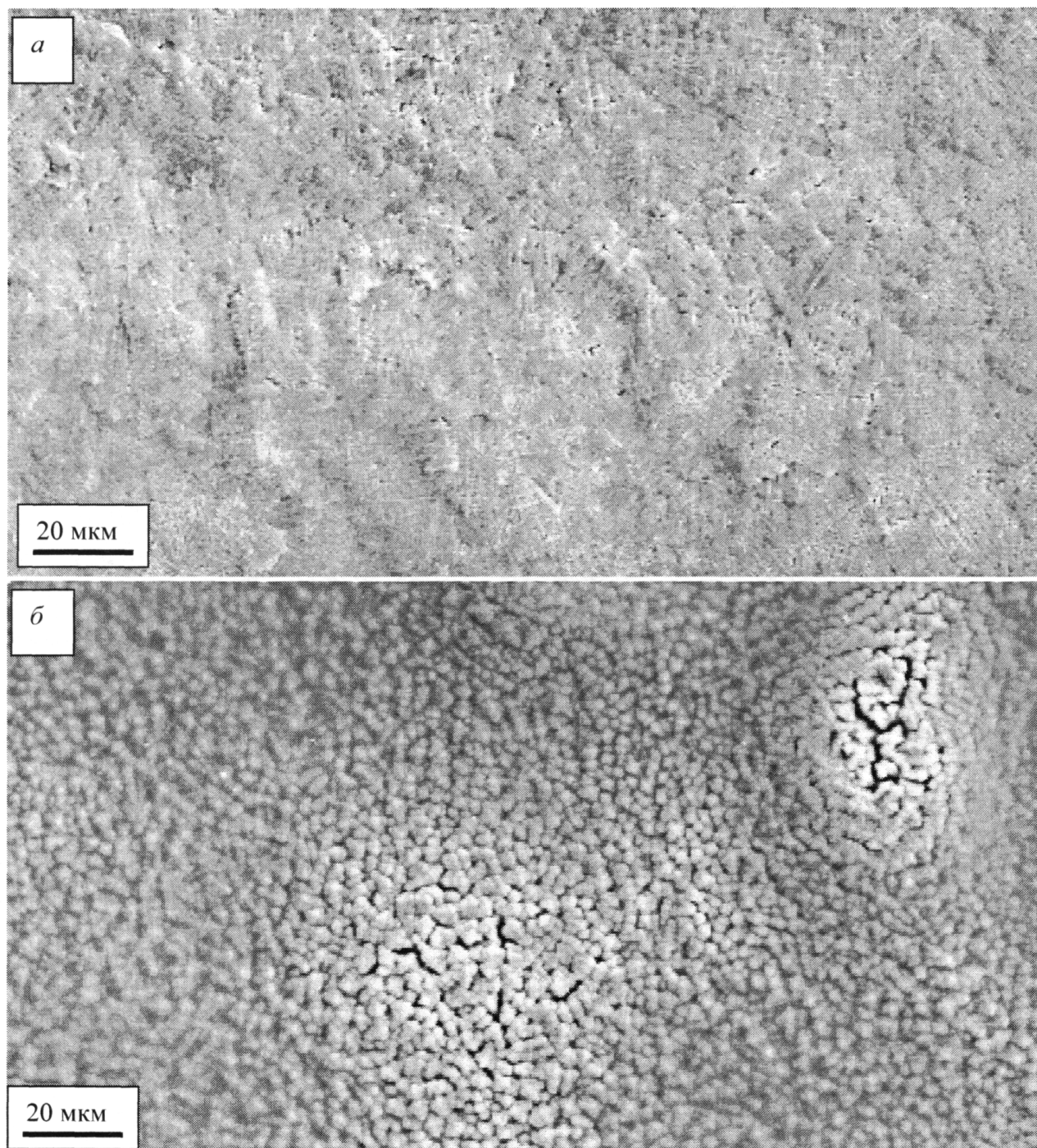


Рис. 3. Структура дендритной (а) и ячеистой (б) кристаллизации поверхности титанового сплава ВТ6 после ЭВЛ и последующей ЭПО. Сканирующая электронная микроскопия

В отдельных случаях приготовление обработанных ЭВЛ + ЭПО образцов сплава ВТ6 для анализа методами сканирующей электронной микроскопии сопровождалось разрушением поверхностного слоя путем его отслаивания. Характерное изображение формирующейся при этом структуры приведено на рис. 4.

Анализируя представленные на данном рисунке изображения, можно обнаружить стержневидные образования, расположенные в подслое, т.е. на некотором расстоянии от поверхности облучения. Можно предположить, что расслаивание модифицированной поверхности происхо-

дит по границе раздела жидкой и твердой фаз, т.е. по дну ванны расплава. Размерные характеристики выявленных стержней приведены на рис. 2, б. Средние поперечные размеры стержней $2,24 \pm 0,71$ мкм; реальные размеры стержней изменяются в пределах от 1,25 мкм до 3,75 мкм.

Таким образом, выполненные исследования выявили сложную кинетику растворения оскол-

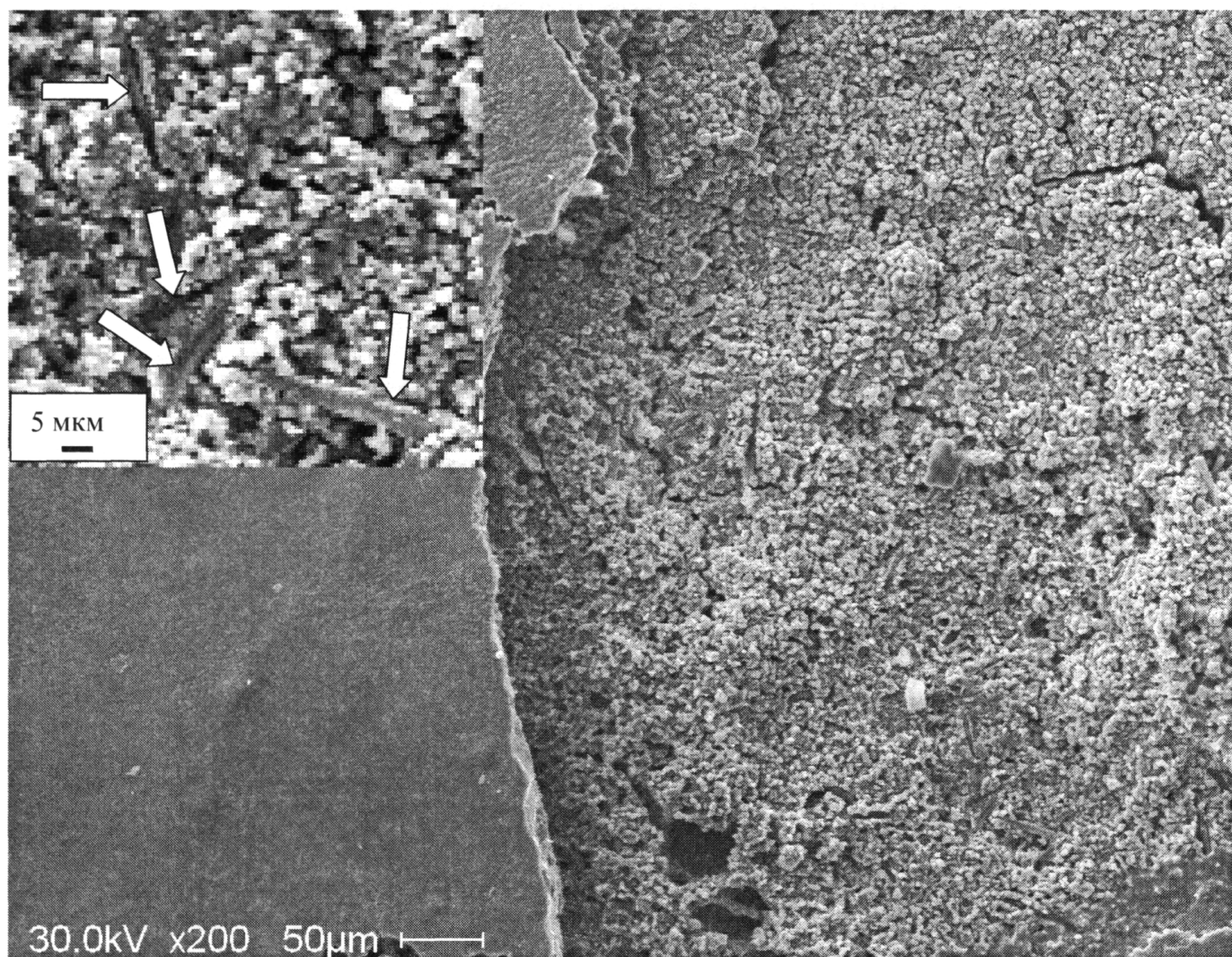


Рис. 4. Структура поверхности и подповерхностного слоя титанового сплава ВТ6, обработанного плазмой, формирующейся при электрическом взрыве углеграфитового волокна и дополнительно облученной электронным пучком. Сканирующая электронная микроскопия.

ков углеграфитовых волокон, попадающих в поверхностный слой при электровзрывном легировании. При указанном режиме электронно-пучковой обработки осколки углеграфитового волокна практически полностью растворяются в поверхностном слое, находящемся в состоянии расплава, и частично растворяются в переходном слое, отделяющем расплавленный слой от слоя, находящегося в твердом состоянии. Наблюдается существенное расхождение экспериментально установленных результатов с результатами теоретических оценок. Время растворения УГВ оказалось существенно меньше, чем следует из теории для волокон данного диаметра. Это можно объяснить следующим образом. На рис. 1 не выявлена тонкая структура УГВ. Согласно [12] УГВ состоят из тончайших микрофибрилл, имеющих ленточный вид толщиной порядка нм и шириной порядка 10 нм. При воздействии на поверхность материала электронным пучком жидкий титан протекает между этими микрофибриллами, что и приводит к их быстрому растворению.

Литература

1. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / Е.А. Будовских, Е.С. Ващук, В.Е. Громов и др. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 207 с.

2. Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титановых сплавов после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Е.А. Будовских и др. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. – 434 с.
3. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки: монография / Ю.Ф. Иванов, С.В. Карпий, М.М. Морозов и др. – Новокузнецк: Изд-во НПК, 2010. – 173 с.
4. Структурно-фазовые состояния титана после электровзрывного легирования и последующей электронно-пучковой обработки / С.В. Карпий, М.М. Морозов, Е.А. Будовских и др. // Успехи физики металлов. – 2010. – Т. 11, № 3. – С. 273–293.
5. Гидродинамическая модель образования наноструктурных слоев / В.Д. Сарычев, А.Ю. Грановский, С.Н. Старовацкая, В.Е. Громов // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2012. – № 6. – С. 87–89.
6. Сарычев, В.Д. Математическая модель генерации термоупругих волн при воздействии концентрированных потоков энергии на материалы / В.Д. Сарычев, М.С. Волошина, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8, № 4. – С. 71–76.
7. Математическая модель растворения частиц углерода в титане при воздействии концентрированных потоков энергии / В.Д. Сарычев, Б.Б. Хаимзон, Н.А. Соскова, В.Е. Громов // Титан. – 2012. – № 1. – С. 4–8.
8. Диффузионная модель растворения частиц углерода в титане при воздействии концентрированных потоков энергии / Б.Б. Хаимзон, В.Д. Сарычев, Н.А. Соскова, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – № 2. – С. 19–21.
9. Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: справочник / Л. Энгель, Г. Клингеле; пер. с нем. Б. Е. Левина; под ред. М. Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1986. – 230 с.
10. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Кристалл, И.С. Ясников, В.И. Полунин и др. – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.
11. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с.
12. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.

ANALYSIS OF CARBON DISSOLUTION IN TITANIUM UNDER ELECTRON BEAM TREATMENT

V.E. Gromov¹, S.V. Raykov², D.A. Sherstobitov³, Yu.F. Ivanov⁴, B.B. Khaimzon⁵, S.V. Konovalov⁶

Analysis of structure phase state of titanium alloy BT6 subjected to electroexplosive alloying by carbon graphite fibers and following electron beam treatment is carried out by methods of scanning electron microscopy. The carbon graphite fibres dissolution process on each stage of treatment is considered. The comparison with the results of theoretical model representations is realized.

Keywords: carbon dissolution, titanium, fibres, scanning electron microscopy.

¹ Gromov Viktor Evgenievich is Dr Sc (Physics and Mathematics), Professor, Head of Physics Department, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

E-mail gromov@physics.sibsui.ru

² Raykov Sergey Valentinovich is Cand Sc (Engineering), Senior Researcher, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

³ Sherstobitov Sergey Aleksandrovich is Junior Research Fellow, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

⁴ Ivanov Yury Fedorovich is Dr Sc (Physics and Mathematics), Professor, Chief Scientist Officer, Institute of High Current Electronics SB RAS

E-mail yufi55@mail.ru

⁵ Khaimzon Boris Bernardovich is Cand Sc (Physics and Mathematics), Docent, Department of Physics and Methodic of Teaching Physics, Kuzbass State Pedagogical Academy

E-mail khaimzon@yandex.ru

⁶ Konovalov Sergey Valerievich is Cand Sc (Engineering), docent, Physics Department, Siberian State Industrial University

E-mail konovalov@physics.sibsui.ru

References

1. Budovskikh E.A., Vashhuk E.S., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Koval' N.N. *Formirovanie strukturno-fazovykh sostoyanij metallov i splavov pri elektrovzryvnom legirovanii i elektronno-puchkovoј obrabotke* [Formation of structural-phase states of metals and alloys at electroexplosive doping and electron-beam processing]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2011. 207 p. (in Russ.).
2. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Budovskikh E.A. *et al.* *Struktura, fazovyy sostav i svoystva poverkhnostnykh sloev titanovykh splavov posle elektrovzryvnogo legirovaniya i elektronno-puchkovoј obrabotki* [The structure, phase composition and properties of the surface layers of titanium alloys after electroexplosive doping and electron-beam processing]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2012. 434 p. (in Russ.).
3. Ivanov Yu.F., Karpij S.V., Morozov M.M., Koval' N.N., Budovskix E.A., Gromov V.E. *Struktura, fazovyy sostav i svoystva titana posle e'lektrovzryvnogo legirovaniya i e'lektronno-puchkovoј obrabotki: monografiya* [The structure, phase composition and properties of titanium after electroexplosive doping and electron-beam processing: Monograph]. Novokuzneck: NPK, 2010. 173 p. (in Russ.).
4. Karpij S.V., Morozov M.M., Budovskikh E.A. *et al.* *Strukturno-fazovye sostoyaniya titana posle e'lektrovzryvnogo legirovaniya i posleduyushhej e'lektronno-puchkovoј obrabotki* [Structural and phase states of titanium after electroexplosive doping and subsequent electron-beam processing]. *Uspekhi fiziki metallov*. 2010. Vol. 11, no. 3. pp. 273–293. (in Russ.).
5. Sarychev V.D., Granovskij A.Yu., Starovackaya S.N., Gromov V.E. *Gidrodinamicheskaya model obrazovaniya nanostrukturnykh sloev* [Hydrodynamic model of nanostructured layers forming] / *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2012. no. 6. pp. 87–89. (in Russ.).
6. Sarychev V.D., Voloshina M.S., Gromov V.E. *Matematicheskaya model generacii termouprugikh voln pri vozdeystvii koncentrirovannykh potokov energii na materialy* [A mathematical model for the generation of thermoelastic waves under the influence of concentrated energy flows of materials]. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2011. Vol. 8, no. 4. pp. 71–76. (in Russ.).
7. Sarychev V.D., Khaimzon B.B., Soskova N.A., Gromov V.E. *Matematicheskaya model rastvoreniya chastic ugleroda v titane pri vozdeystvii koncentrirovannykh potokov e'nergii* [A mathematical model of dissolution of carbon particles in titanium when exposed to concentrated energy flows]. *Titan*. 2012. no. 1. pp. 4–8. (in Russ.).
8. Khaimzon B.B., Sarychev V.D., Soskova N.A., Gromov V.E. *Diffuzionnaya model rastvoreniya chastic ugleroda v titane pri vozdeystvii koncentrirovannykh potokov energii* [Diffusion model of dissolution of carbon particles in titanium when exposed to concentrated energy flows]. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2012. no. 2. pp. 19–21. (in Russ.).
9. Engel L., Klingele G. *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya. Razrushenie: spravochnik* [Raster electron microscopy. Destruction: A Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 230 p. (in Russ.). [Engel L., Klingele H. *Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschaden*. Munchen, Wien, 1982].
10. Krishtall M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I., Filatov A.M., Ulyanenko A.G. *Skanirovannaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyj mikroanaliz v primerax prakticheskogo primeneniya* [Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis in the practical application of]. Moscow: Tekhnosfera, 2009. 208 p.
11. Brandon D., Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya* [The microstructure of materials. Methods of research and monitoring]. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 384 p. (in Russ.).
12. Arzamasov B.N., Makarova V.I., Mukhin G.G. *et al.* *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow: izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2003. 648 p. (in Russ.).

Поступила в редакцию 17 октября 2012 г.