

УДК 669. 295

## ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

**К.В. Аксенова<sup>1</sup>, И.А. Комиссарова<sup>1</sup>, В.Е. Громов<sup>1</sup>, С.В. Коновалов<sup>2</sup>, С. Чэн<sup>2</sup>**

*E-mail:* gromov@physics.sibsiu.ru

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика  
С.П. Королева, Самара, Россия

**Аннотация.** Большинство эксплуатационных характеристик металлов и сплавов определяется структурно-фазовым состоянием поверхностных слоев, которое можно значительно улучшить путем упрочнения поверхности. Осуществлена обработка силумина эвтектического состава АК12 и технически чистого титана марки ВТ1-0 высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в различных режимах. Выполнены многоцикловые усталостные испытания и выявлены режимы облучения, позволившие многократно повысить усталостную долговечность исследуемых материалов. Методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии исследованы структурно-фазовые состояния и дефектная субструктура силумина и титана, подвергнутых многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения. Облучение поверхности силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (энергия электронов 18 кэВ,  $E_s = 20$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 5$  имп.,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>) позволяет в 3,5 раза увеличить его усталостную долговечность. Основными причинами многократного повышения усталостной долговечности силумина являются формирование в поверхностном слое многофазной субмикро- и наноразмерной структуры, измельчение крупных пластин кремния до наноразмерного состояния. Физическими причинами увеличения в 2,2 раза усталостной долговечности титана ВТ1-0 после электронно-пучковой обработки (энергия электронов 16 кэВ,  $E_s = 25$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 3$  имп.,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>) являются формирование пластинчатой субструктуры, обусловленное высокоскоростной кристаллизацией поверхностного слоя титана, снижение скалярной плотности дислокаций более чем в два раза.

**Ключевые слова:** усталость, электронно-пучковая обработка, силумин, титан, структура, фазовый состав.

## INCREASE OF THE FATIGUE DURABILITY OF LIGHT ALLOYS BY ELECTRON BEAM TREATMENT

**K.V. Aksenova<sup>1</sup>, I.A. Komissarova<sup>1</sup>, V.E. Gromov<sup>1</sup>, S.V. Konovalov<sup>2</sup>, S. Chen<sup>2</sup>**

*E-mail:* gromov@physics.sibsiu.ru

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

<sup>2</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

**Abstract.** Most of the metals and alloys performance characteristics are determined by the structural phase state of the surface layers. These characteristics can be significantly improved by surface hardening. Silumin of the eutectic composition АК12 and technically pure titanium of the VT1-0 grade were treated by a high-intensity pulsed electron beam in various modes. Many-cycle fatigue tests were carried out and irradiation modes were revealed, which made it possible to increase significantly the fatigue life of the materials under study. Using the methods of scanning and transmission electron diffraction microscopy, we studied the structural-phase states and defective substructure of silumin and titanium, subjected to multi-cycle fatigue tests to their failure. It was revealed that irradiation of the silumin surface with a high-intensity pulsed electron beam with electron energy parameters 18 keV,  $E_s = 20$  J/cm<sup>2</sup>,  $\tau = 150$   $\mu$ s,  $N = 5$  pulses,  $f = 0.3$  s<sup>-1</sup> allows its fatigue life to be increased 3.5 times. The main reasons for the multiple increase in the fatigue life of silumin are the formation of a multiphase submicro- and nanoscale structure in the surface layer, and the grinding of large silicon wafers to a nanoscale state. The physical reasons for the 2.2-fold increase in the fatigue life of technically pure titanium after electron-beam treatment according to the mode (electron energy 16 keV,  $E_s = 25$  J/cm<sup>2</sup>,  $\tau = 150$   $\mu$ s,  $N = 3$  pulses,  $f = 0.3$  s<sup>-1</sup>) are the formation of a lamellar substructure due to high-speed crystallization of the titanium surface layer and a more than twofold decrease in the scalar dislocation density.

**Keywords:** fatigue, electron-beam treatment, silumin, titanium, structure, phase composition.

### **Введение**

В современных условиях эксплуатации машин и конструкций в число основных задач выдвигается решение проблемы повышения прочности, ресурса, живучести и долговечности материалов. Наиболее ответственные и уникальные изделия, машины и конструкции эксплуатируются в режимах циклических деформаций, которые и определяют разрушение даже при незначительных нагрузках [1]. Большинство эксплуатационных характеристик металлов и сплавов обусловлено структурно-фазовым состоянием поверхностных слоев. Эти характеристики можно значительно повысить с помощью упрочнения поверхности [2 – 4].

Одним из перспективных и апробированных методов модифицирования структурно-фазовых состояний поверхностных слоев металлов и сплавов является электронно-пучковая обработка (ЭПО) [5 – 7]. Обработка электронными пучками, обладающими сравнительно большой (сотни микросекунд) длительностью воздействия, приводит к формированию глубоких (до 0,1 мм) модифицированных слоев с дисперсной гомогенной структурой и высокими эксплуатационными характеристиками. Применение электронных пучков позволяет в десятки раз сократить время обработки материала по сравнению с традиционными методами, проводить локальное упрочнение в необходимых местах, а также автоматизировать процесс обработки [8 – 10]. Все это обуславливает высокую экономическую эффективность практического использования данного метода упрочнения.

Настоящая работа является продолжением проводимых в последние годы в научной школе кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля СибГИУ исследований по установлению влияния внешних энергетических воздействий на цветные металлы и сплавы, подвергаемые пластической деформации [11 – 15].

Целью настоящей работы является установление механизмов и закономерностей влияния электронно-пучковой обработки на повышение усталостного ресурса, формирование и эволю-

цию структуры и фазового состава силумина АК12 и титана ВТ1-0.

### **Материалы и методика исследования**

В качестве материалов для исследований использовали промышленный сплав АК12 (силумин эвтектического состава) в литом состоянии и технически чистый титан ВТ1-0 после отжига при температуре 1173 К в течение 90 мин с охлаждением в печи. Проведение испытаний на усталость, как и в работах [12 – 15], осуществляли на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба. Частота нагружения образцов изгибом составляла 15 Гц. При испытаниях определяли число циклов до полного разрушения образцов.

Модифицирование поверхностного слоя образцов осуществляли высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия на установке «СОЛО», разработанной в ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН» (г. Томск). Электронно-пучковую обработку проводили со стороны концентратора напряжений перед проведением усталостных испытаний. Режимы ЭПО представлены в таблице.

Исследования поверхности разрушения проводены методами сканирующей электронной микроскопии. Анализ фазового состава и состояния дефектной субструктуры материала выполнен методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100F). Фольги для исследований готовили методом ионного утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом из образцов параллельно поверхности разрушения на максимально близком к ней расстоянии.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Результаты испытаний образцов силумина и титана на многоцикловую усталость приведены на рис. 1. Образцы силумина в исходном состоянии выдерживали  $1,30 \cdot 10^5$  циклов до разрушения ( $N_u$ ), а в зависимости от режима ЭПО это число возрастало до  $5,17 \cdot 10^5$  (рис. 1, а). Макси-

**Режимы электронно-пучковой обработки**

| Материал                                                                 | Силумин АК12 |      |      |      |      | Титан ВТ1-0 |    |    |    |    |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|------|------|------|------|-------------|----|----|----|----|
| Режим                                                                    | 1            | 2    | 3    | 4    | 5    | 1           |    |    |    |    |
| Энергия электронов, кэВ                                                  | 18           |      |      |      |      | 16          |    |    |    |    |
| Частота следования импульсов ( $f$ ), Гц                                 | 0,3          |      |      |      |      | 0,3         |    |    |    |    |
| Длительность импульса ( $\tau$ ), мкс                                    | 150          |      |      |      | 50   | 150         |    |    |    |    |
| Плотность энергии пучка электронов ( $E_S$ ), Дж/см <sup>2</sup>         | 20           | 15   | 25   | 20   | 10   | 10          | 15 | 20 | 25 | 30 |
| Количество импульсов воздействия ( $N$ ), имп.                           | 1            | 3    |      | 5    |      | 3           |    |    |    |    |
| Совокупная плотность мощности ( $W_S \cdot N$ ), Вт·имп./см <sup>2</sup> | 0,13         | 0,30 | 0,51 | 0,67 | 1,00 | –           |    |    |    |    |

мальное увеличение усталостной долговечности (приблизительно в 3,5 раза) обеспечивал режим ЭПО с параметрами: энергия электронов 18 кэВ,  $E_S = 20$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 5$  имп.,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup> (рис. 1, а, режим 4). Усталостную долговечность титана более чем в два раза позволил увеличить режим облучения с параметрами: энергия электронов 16 кэВ,  $E_S = 25$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 3$  имп.,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup> (рис. 1, б).

В исходном состоянии силумин является многофазным материалом и содержит, кроме фаз на основе алюминия и кремния, интерметаллидные соединения состава Al – Si – Fe – Mn. Большую часть выделений вторых фаз составляют включения кремния преимущественно пластинчатой формы с размерами от единиц до десятков микрометров. Электронно-пучковая обработка поверхности силумина в зависимости от параметров энергии пучка электронов сопровождается либо оплавлением поверхности образца ( $E_S = 15$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 3$  имп.), либо плавлением поверхностного слоя материала толщиной от единиц до десятков микрометров ( $E_S = 20$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 5$  имп.) [13, 14]. Проведение ЭПО силумина по режиму  $E_S = 15$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 3$  имп. инициирует начальную стадию плавления включений кремния, приводит к протеканию двух взаимосвязанных процессов: глобуляризации включений кремния (рис. 2, а) и хрупкого разрушения пластин кремния (рис. 2, б). Процесс разрушения пластин сопровождается формированием многочисленных микропор, расположенных вдоль границы раздела пластина – матрица, и микротрещин, расположенных в пластинах кремния (рис. 2, в). Очевидно, что формирование такого

высокодефектного поверхностного слоя и способствует низкой усталостной долговечности.

Проведение ЭПО силумина (по режиму  $E_S = 20$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 5$  имп.) инициирует высокоскоростное плавление и последующую высокоскоростную кристаллизацию, приводит к существенному измельчению структуры поверхности (рис. 2, д). На поверхности облучения формируется однородная структура зеренного (ячеистого) типа (размер областей изменяется от 30 до 50 мкм). Области разделены прослойками кремния, поперечные размеры которых не превышают 10 мкм [14]. Толщина расплавленного слоя образцов силумина, подвергнутых ЭПО (с параметрами  $E_S = 20$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 5$  имп.) и разрушенных после  $5,17 \cdot 10^5$  циклов, изменяется в пределах до 20 мкм (рис. 2, е). Концентраторы напряжений (микропоры, микротрещины, микрократеры, хрупкие включения частиц интерметаллидов), способные являться источниками разрушения образцов, на кромке излома не обнаруживаются (рис. 2, д). Высокоскоростная кристаллизация приводит к формированию двухфазной субзеренной структуры (кремний и твердый раствор на основе алюминия), размеры ячеек которой изменяются в пределах от 100 до 250 нм (рис. 2, е). Формирование подобной многофазной субмикро- и наноразмерной структуры и является определяющей причиной, способствующей многократному увеличению усталостной долговечности силумина.

Титан ВТ1-0 в исходном состоянии является поликристаллическим материалом, средний размер зерен которого составляет приблизительно 25 мкм. Исследование морфологии поверхности, сформировавшейся в результате

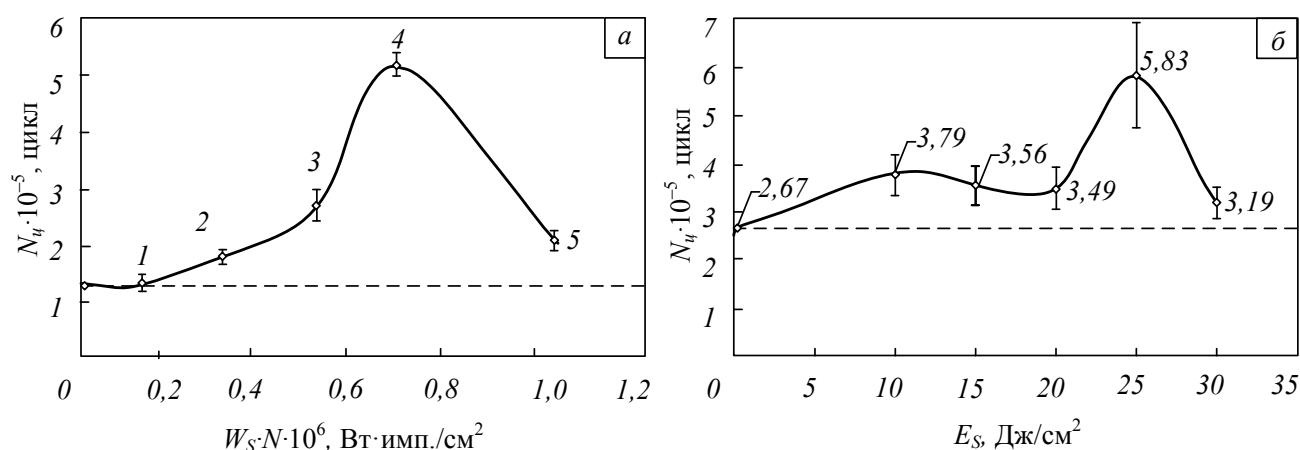


Рис. 1. Зависимость количества циклов  $N_u$  до разрушения силумина от произведения плотности мощности  $W_S$  на количество импульсов воздействия  $N$  пучка электронов (а) и титана от плотности энергии пучка электронов (б) при использовании режимов облучения 1 – 4 (штриховой линией показано среднее значение усталостной долговечности исходного материала)

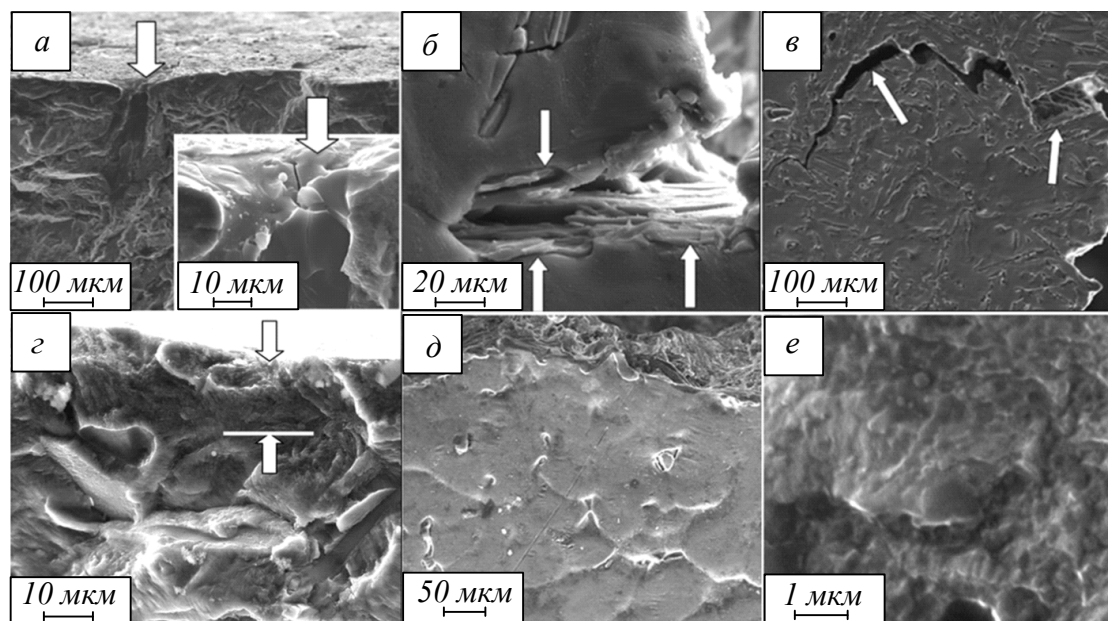


Рис. 2. Изображение поверхности разрушения образцов силумина:

*a – в* – ЭПО с параметрами  $E_S = 15 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 150 \text{ мкс}$ ,  $N = 3 \text{ имп.}$ , *г – е* – ЭПО с параметрами  $E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 150 \text{ мкс}$ ,  $N = 5 \text{ имп.}$  (стрелками на поз. *a, в* указаны микротрещины, сформировавшиеся при усталостных испытаниях на поверхности облучения, на поз. *б* – пластины кремния, разрушенные в процессе усталостных испытаний, на поз. *г* – расплавленный электронным пучком поверхностный слой)

усталостных испытаний до разрушения титана [15], облученного электронным пучком (с параметрами  $E_S = 20 \div 30 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 150 \text{ мкс}$ ,  $N = 1 \text{ имп.}$ ), показало, что усталостный излом имеет многослойное строение и характеризуется наличием поверхностного слоя толщиной  $10 - 15 \text{ мкм}$ , промежуточного слоя толщиной  $25 - 35 \text{ мкм}$ , переходного слоя и основного объема материала (слои 1 – 4 на рис. 3, *a*). Поверхностный слой 1 имеет столбчатое строение, что указывает на высокую скорость кристаллизации материала. Слой 1 сформировался в результате плавления и скоростной кристаллизации однофазного (жидкая фаза) состояния. Слой 2 формируется в результате кристаллизации двухфазного (жидкая фаза + твердая фаза) состояния материала.

Структура поверхностного слоя технически чистого титана, облученного электронным пучком и разрушенного в результате усталостных испытаний, существенно отличается от структуры, выявленной в титане в необлученном состоянии: поверхностный слой толщиной приблизительно  $10 \text{ мкм}$  имеет пластинчатую структуру (рис. 3, *б*). Пластины  $\alpha$ -титана, как правило, расположены под углом  $70 - 90^\circ$  к поверхности облучения. По мере удаления от поверхности облучения эта тенденция теряется и на глубине приблизительно  $10 \text{ мкм}$  пластины располагаются более разнообразно по отношению к поверхности облучения. На глубине  $12 - 15 \text{ мкм}$  наряду с пластинчатой структурой выявляется субзе-

ренная структура (рис. 3, *в*), которая становится преобладающим типом структуры материала в слое, расположенном на расстоянии  $30 - 40 \text{ мкм}$  от поверхности облучения (рис. 3, *г*). Зеренная структура, подобная структуре необлученных разрушенных образцов технически чистого титана ВТ1-0, выявляется на глубине приблизительно  $80 \text{ мкм}$  (рис. 3, *д*). Скалярная плотность дислокаций, усредненная по всем типам дислокационных субструктур, после ЭПО уменьшается более, чем в два раза: до  $1,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Таким образом, физической причиной увеличения усталостной долговечности технически чистого титана марки ВТ1-0, облученного интенсивным импульсным электронным пучком, являются формирование пластинчатой субструктуры, которое инициируется высокоскоростной кристаллизацией поверхностного слоя титана, и снижение средней плотности дислокаций.

### Выводы

В результате проведенных методами современного физического материаловедения исследований установлено влияние электронно-пучковой обработки на изменение усталостной долговечности, формирование структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в условиях усталостного нагружения силумина АК12 и технически чистого титана ВТ1-0.

Показано, что высокоскоростное плавление и последующая кристаллизация поверхностного

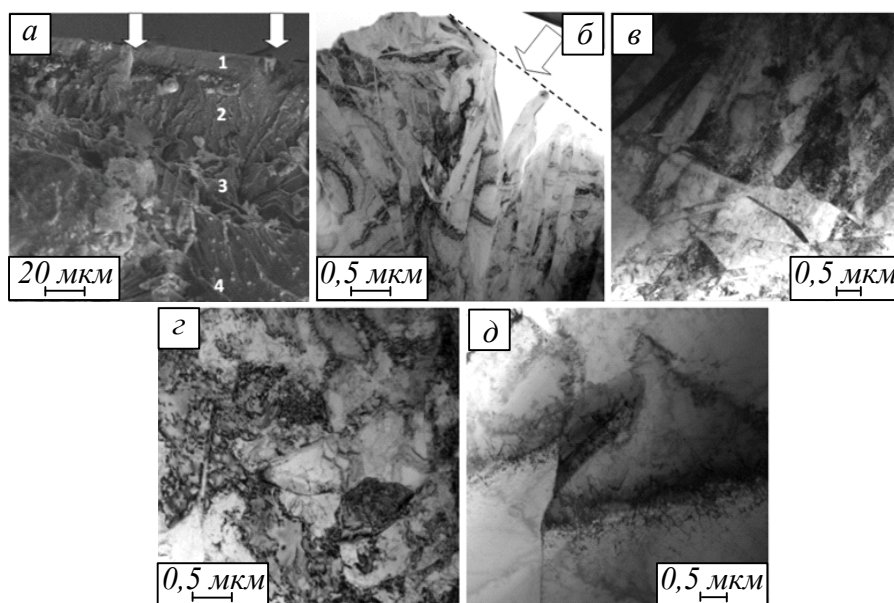


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры технически чистого титана, подвергнутого ЭПО ( $E_S = 25 \text{ Дж/см}^2$ ;  $\tau = 150 \text{ мкс}$ ;  $N = 3 \text{ имп.}$ ) и последующим усталостным испытаниям до разрушения (на поз. *а* штриховой линией обозначена поверхность образца, стрелками указано направление облучения электронным пучком)

слоя, протекающие при облучении силумина электронным пучком (энергия электронов 16 кэВ,  $E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$ ;  $\tau = 150 \text{ мкс}$ ;  $N = 5 \text{ имп.}$ ,  $f = 0,3 \text{ с}^{-1}$ ), приводят к образованию структуры ячеистого типа с распределенным по границам ячеек кремнием в виде протяженных прослоек или включений глобулярной формы. Формирование подобной микро- и наноразмерной многофазной структуры и измельчение крупных пластин кремния до наноразмерного состояния являются основными причинами многократного увеличения усталостной долговечности силумина, облученного электронным пучком.

Облучение технически чистого титана марки ВТ1-0 высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (энергия электронов 16 кэВ,  $E_S = 25 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 150 \text{ мкс}$ ,  $N = 3 \text{ имп.}$ ,  $f = 0,3 \text{ с}^{-1}$ ) приводит к измельчению зеренной структуры и формированию внутризеренной субструктуры, то есть к формированию в поверхностном слое дополнительных структурных уровней субмикро- и наноразмерного диапазона. Выявлен слоистый характер строения поверхностного слоя, что является одной из основных причин увеличения более чем в два раза усталостной долговечности титана.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов. – Новосибирск: НГТУ, 2001. – 80 с.
2. Емельянов С.Г., Родионов А.А., Осинцев А.Н., Колмыков Д.В. Комбинированные методы упрочняющей обработки стальных изделий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. Ч. 1. № 2 (41). С. 65 – 71.
3. Zhukeshov A.M., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., Ibraimova S.A. Hardening of structural steel by pulsed plasma treatment // Journal of Nano and Electronic Physics. 2014. Vol. 6 (3). P. 03066.
4. Якушин В.Л. Модифицирование углеродистых и низколегированных сталей потоками высокотемпературной импульсной плазмы // Металлы. 2005. № 2. С. 12 – 24.
5. Hao Y., Gao B., Tu G.F. et al. Surface modification of Al-12.6Si alloy by high current pulsed electron beam // Applied Surface Science. 2012. Vol. 258. P. 2052 – 2056.
6. Hu J.J., Zhang G.B., Xu H.B., Chen Y.F. Microstructure characteristics and properties of 40Cr steel treated by high current pulsed electron beam // Materials Science and Technology. 2012. Vol. 27 (4). P. 300 – 303.
7. Zhang X.D., Hao S.Z. et al. Surface modification of pure titanium by pulsed electron beam // Applied Surface Science. 2011. No. 257. P. 5899 – 5902.
8. Dong C., Wu A., Hao S. et al. Surface treatment by high current pulsed electron beam // Surface and Coatings Technology. 2003. Vol. 163-164. P. 620 – 624.
9. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 287 с.
10. Федун В.И., Коляда Ю.Е. Динамика фазовых превращений при поверхностной мо-

- дификации металлов и сплавов электронным пучком // Вопросы атомной науки и техники. 2010. № 4. С. 316 – 320.
11. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Соскова Н.А. и др. Электронно-пучковая обработка поверхности сплавов на основе титана, модифицированных плазмой электрического взрыва проводящего материала // Изв. РАН. Серия Физическая. 2012. Т. 76. № 11. С. 1393.
12. 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.
13. Модифицирование структуры и свойств легких сплавов упрочняющими технологиями / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, К.В. Аксёнова, Л.П. Бащенко, Т.Ю. Кобзарева. – Новокузнецк: Полиграфист, 2015. – 226 с.
14. Усталость силумина, модифицированного электронно-пучковой обработкой / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, К.В. Аксёнова. – Новокузнецк: Полиграфист, 2016. – 184 с.
15. Kononov S.V., Komissarova I.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kosinov D.A. Structural and phase changes under electropulse treatment of fatigue-loaded titanium alloy VT1-0 // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8 (1). P. 1300 – 1307.
- © 2020 г. *К.В. Аксенова, И.А. Комиссарова, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, С. Чэнь*  
Поступила 8 февраля 2020 г.