



УДК 669.713.017

DOI 10.17073/0368-0797-2021-2-129-134



ПОВЫШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

Ю. Ф. Иванов¹, В. Е. Громов², Д. В. Загуляев²,
С. В. Коновалов³, Ю. А. Рубанникова²

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

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

³ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

Аннотация. Выполнен обзор отечественных и зарубежных работ по применению интенсивных импульсных электронных пучков для поверхностной обработки металлов, сплавов, металлокерамических и керамических материалов. Отмечены преимущества использования электронных импульсных пучков по сравнению с лазерными лучами, потоками плазмы, ионными пучками. Проанализированы перспективные направления использования электронно-пучковой обработки: 1 – выглаживание поверхности, избавление от поверхностных микротрещин с одновременным изменением структурно-фазового состояния поверхностного слоя для создания высокопроизводительных технологий финишной обработки ответственных металлических изделий сложной формы из титанового сплава Ti-6Al-4V и титана, сталей различного класса, твердого сплава WC – 10 % Co, алюминия; 2 – удаление микроразрывов, образующихся при изготовлении прецизионных пресс-форм (сталь SKD11) и биомедицинских изделий (сплав Ti-6Al-4V); 3 – финишная обработка поверхности пресс-форм и штампов; 4 – улучшение функциональных свойств металлических биоматериалов (нержавеющей стали, титана и его сплавов, сплавов на основе никелида титана с эффектом памяти формы, сплавов магния); 5 – обработка изделий медицинского назначения и имплантатов; 6 – формирование поверхностных сплавов для мощных электродинамических систем; 7 – улучшение характеристик лопаток авиационных двигателей и лопаток компрессоров; 8 – формирование термобарьерных покрытий, наносимых на поверхность камер сгорания. Показано, что при правильном выборе параметров процесса, таких как ускоряющее напряжение, плотность энергии пучка электронов, количество и длительность импульсов, возможен тщательный контроль и/или манипулирование характеристиками структурно-фазового состояния и свойств поверхности. Отмечено, что для улучшения свойств материала и увеличения длительности эксплуатации изделий из него важным фактором является модификация структуры с целью формирования субмикро- или наноразмерного зерна (или субзеренной структуры).

Ключевые слова: электронно-пучковая обработка, модификация поверхности, металлы, сплавы, стали, перспективы применения, наноразмерная структура

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Рубанникова Ю.А. Повышение функциональных свойств сплавов электронно-пучковой обработкой // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 129–134. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-129-134>

INCREASE OF ALLOYS FUNCTIONAL PROPERTIES BY ELECTRONIC BEAM PROCESSING

Yu. F. Ivanov¹, V. E. Gromov², D. V. Zagulyaev²,
S. V. Kononov³, Yu. A. Rubannikova²

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS (2/3 Akademicheskii ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

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

³ Samara National Research University (34 Moskovskoe route, Samara 443086, Russian Federation)

Abstract. The article considers a review of domestic and foreign works on the use of intense pulsed electron beams for surface treatment of metals, alloys, cermet and ceramic materials. The advantages of using electron pulsed beams over laser beams, plasma flows, and ion beams are noted. The promising directions of using electron-beam processing were analyzed and are as following: 1 – smoothing the surface, getting rid of surface microcracks, while simultaneously changing the structural-phase state of the surface layer, to create high-performance technologies for the finishing processing of critical metal products of complex shape made of titanium alloy Ti-6Al-4V and titanium; steels of various classes; hard alloy WC – 10 wt. % Co; aluminum; 2 – removal of microbursts formed during the manufacture of precision molds (SKD11 steel) and biomedical products (Ti-6Al-4V alloy); 3 – finishing the surface of molds and dies; 4 – improvement of the functional properties of metallic biomaterials: stainless steel, titanium and its alloys, alloys based on titanium nickelide with shape memory effect, and magnesium alloys; 5 – processing of medical devices and implants; 6 – formation of the surface alloys for powerful electrodynamic systems; 7 – improvement of the characteristics of aircraft engine and compressor blades; 8 – formation of thermal barrier coatings applied to the surface of the combustion chambers. It is shown that with the correct choice of process parameters, such as accelerating voltage, energy density of electron beam, number of pulses, and pulse duration, it is possible to control carefully and/or manipulate the

characteristics of structural-phase state and surface properties. In order to improve the properties of the material and the durability of the products made of it, an important factor is the structure modification to form a submicro-nanosized grain (or subgrain structure).

Keywords: electron beam treatment, surface modification, metals, alloys, steels, application prospects, nanoscale structure

For citation: Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Kononov S.V., Rubannikova Yu.A. Increase of alloys functional properties by electronic beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 129–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-129-134>

ВВЕДЕНИЕ

Успехи в области генерации электронных пучков импульсного и непрерывного действия [1], разработка и освоение соответствующего оборудования [2], многочисленные исследования, выполненные в области материаловедения металлов и сплавов, металлокерамических и керамических материалов, обработанных электронными пучками [3 – 5], подготовили основы использования таких источников энергии в различных областях промышленности, строительной индустрии и медицины. Эти направления продолжают активно развиваться. В многочисленных работах [6, 7] полагается, что обработка электронным пучком, несомненно, является перспективной технологией, которая в ряде случаев на настоящий момент не имеет альтернативы.

Основные перспективные направления использования электронно-пучковой обработки металлов, сплавов и металлокерамических материалов импульсным электронным пучком:

- выглаживание поверхности, избавление от поверхностных микротрещин с одновременным изменением структурно-фазового состояния поверхностного слоя для высокопроизводительной финишной обработки металлических изделий (ответственного назначения) сложной формы из титанового сплава Ti-6Al-4V и титана [8, 9], сталей различного класса [10, 11], твердого сплава WC – 10 % Co [12], алюминия [13];

- удаление микрозаусенцев, образующихся при изготовлении прецизионных пресс-форм (сталь SKD11) и биомедицинских изделий (сплав Ti-6Al-4V) [14];

- финишная обработка поверхности пресс-форм и штампов [10, 11];

- улучшение функциональных свойств металлических биоматериалов, нержавеющей стали [15], титана и его сплавов [8, 9, 16, 17], сплавов на основе никелида титана с эффектом памяти формы [18], сплавов магния [19];

- обработка изделий медицинского назначения и имплантатов [20];

- формирование поверхностных сплавов для мощных электродинамических систем [21];

- улучшение характеристик лопаток авиационных двигателей и лопаток компрессоров [22];

- формирование термобарьерных покрытий, наносимых на поверхность камер сгорания [23];

- обработка поверхности катания железнодорожных рельсов [24 – 26].

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В работе [27] по результатам анализа исследований [28 – 30] показано, что легкие сплавы вследствие малого веса являются предпочтительными для использования, когда критичными являются высокая производительность и превосходное сочетание удельных свойств. Более широкое использование этих материалов в аэрокосмической, автомобильной и биомедицинской отраслях промышленности требует существенного улучшения их поверхностных свойств. Инжиниринг поверхности является экономичным и жизнеспособным методом улучшения таких поверхностных свойств материала, как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, усталостная прочность, стойкость к окислению.

Анализ результатов работ [1 – 3, 27] показывает, что методы модификации структуры и свойств поверхности металлов и сплавов, металлокерамических и керамических материалов, основанные на использовании импульсных электронных пучков, имеют заметные преимущества по сравнению с другими методами: возможность обработки больших площадей; значительная глубина проникновения; низкая потеря энергии на ионизацию материала. При бомбардировке поверхности обрабатываемого металла электронным пучком превращения происходят в слоях, расположенных последовательно на различной глубине:

- поверхностный расплавленный слой;
- зона термического влияния;
- зона высоких напряжений, возникающая под воздействием ударной волны, которая формируется в результате бомбардировки материала электронным пучком.

На рис. 1 приведены результаты, полученные при исследовании методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии поперечного сечения облученных образцов предварительно закаленной стали 45 (Fe–0,45C) [31].

Структурный анализ поперечного сечения облученных образцов, выполненный методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, показал, что, независимо от количества импульсов воздействия электронного пучка материал имеет градиентную по глубине структуру, состоящую из нескольких слоев (рис. 1). При однократном облучении у поверхности образуется нанокристаллический слой толщиной приблизительно 0,1 мкм, который состоит из зе-

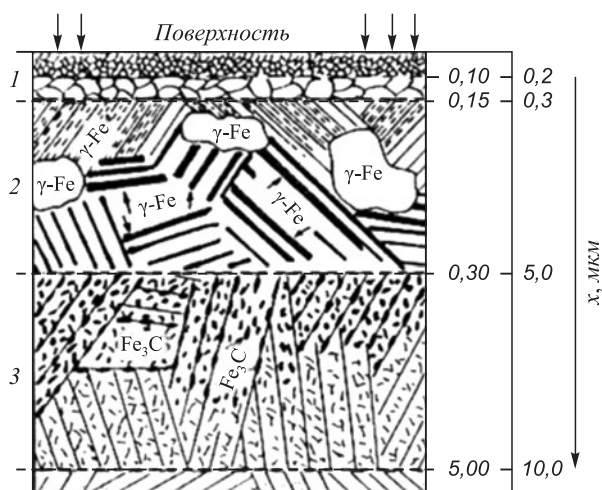


Рис. 1. Схема строения модифицированного электронным пучком образца предварительно закаленной стали 45 (длительность импульса пучка электронов 0,8 мкс, плотность энергии 2,2 Дж/см²) [32]

Fig. 1. Schematic structure diagram of a sample of pre-quenched steel 45 modified by electron beam (duration of electron beam pulse 0.8 μ s, energy density 2.2 J/cm²) [32]

рен α -фазы (ОЦК твердый раствор на основе железа) и γ -фазы (ГЦК твердый раствор на основе железа) примерно в равных долях со средним размером зерна приблизительно 30 нм. Согласно тепловым расчетам [32] этот слой образован в результате импульсного плавления (время жизни расплава составляет примерно 0,5 мкс) и последующей высокоскоростной (до 10^{10} К/с) закалки из расплава. Скорость перемещения фронта затвердевания у поверхности достигает примерно 5 м/с. Под нанокристаллическим слоем формируется подслой толщиной около 0,1 мкм на основе α -фазы со средним размером зерна 200 нм.

При правильном выборе параметров процесса, таких как ускоряющее напряжение, плотность энергии пучка электронов, количество и длительность импульса, возможен тщательный контроль и/или манипулирование характеристиками структурно-фазового состояния и свойств поверхности.

Для улучшения свойств материала и длительности эксплуатации изделий из него важным фактором является модификация структуры с целью формирования субмикро- или наноразмерного зерна (или субзеренной структуры) [33]. Поверхностное плавление и сверхбыстрое затвердевание, имеющее место при импульсной электронно-пучковой обработке, позволяют формировать в поверхностном слое материала зеренную структуру наноразмерного диапазона. Этот процесс можно контролировать, изменяя параметры пучка электронов (плотность энергии, длительность и количество импульсов) [2, 3, 27].

Установлено [34], что обработка сплава Al–Si импульсным электронным пучком приводит к формированию структуры ячеистого типа. Толщина слоя

со структурой ячеистой кристаллизации достигает 40 мкм. Средний размер ячеек высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя составляет $0,4 \pm 0,11$ мкм. При большем удалении от поверхности облучения средние размеры ячеек кристаллизации увеличиваются и на нижней границе слоя с ячеистой структурой достигают значений $0,65 \pm 0,22$ мкм.

Поверхностный слой силумина со структурой ячеистой кристаллизации характеризуется наличием зерен пластинчатой эвтектики (рис. 2). Первые зерна эвтектики обнаруживаются в слое, расположенном на глубине приблизительно 15 мкм. По мере удаления от поверхности облучения относительное содержание зерен эвтектики увеличивается. Зерна эвтектики располагаются островками или прослойками между ячейками высокоскоростной кристаллизации алюминия. Поперечные размеры пластин эвтектики изменяются в пределах от 25 до 50 нм.

Выявленные микроструктурные модификации силумина помогают улучшить свойства поверхности, а именно, твердость, износостойкость, коррозионную стойкость, устойчивость к усталости, стойкость к окислению и многие другие свойства, чувствительные к состоянию поверхности материала. Благодаря этому свойства обработанных импульсными электронными пучками легких металлов и сплавов по сравнению с необработанными аналогами существенно повышаются [34].

Принципиально важной особенностью модификации поверхности катания железнодорожных рельсов низкоэнергетическими высокоинтенсивными электронными пучками является отсутствие выраженной поверхности раздела между модифицированным слоем и объемом материала, что определяет хорошие демпфирующие свойства материала при механических

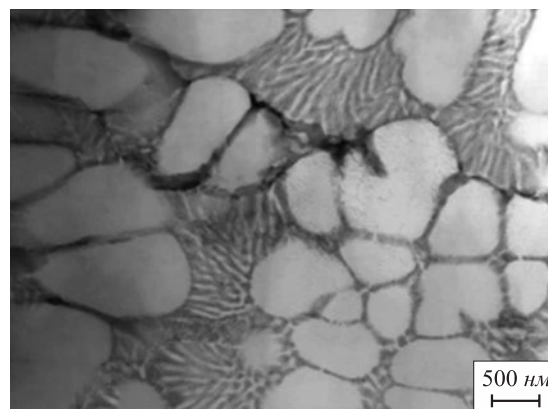


Рис. 2. Структура слоя силумина, расположенного на глубине примерно 30 мкм, после облучения электронным пучком (25 Дж/см, 150 мкс, 3 имп.) [35]

Fig. 2. Structure of the silumin layer located at a depth of about 30 μ m after irradiation with electron beam (25 J/cm², 150 μ s, 3 pulses) [35]

и температурных внешних воздействиях, предотвращает преждевременное зарождение и распространение с поверхности в основной объем материала хрупких микротрещин, приводящих к разрушению [24 – 26].

Выявлен режим облучения высокоинтенсивным электронным пучком (плотность энергии 25 Дж/см²), позволяющий в 2,5 раза увеличить усталостную долговечность рельсовой стали. Показано, что преимущественным местом формирования концентраторов напряжений в облученной электронным пучком стали является граница раздела слоя высокоскоростной кристаллизации и слоя термического влияния (дно ванны расплава). Установлено, что увеличение усталостной долговечности стали, облученной электронным пучком, обусловлено формированием игольчатого профиля гра-

ницы раздела, приводящего к диспергированию концентраторов напряжений и способствующего более однородному пластическому течению в подложке [24 – 26].

Выводы

Выполненный краткий анализ публикаций результатов исследования воздействия импульсных электронных пучков на структуру и свойства поверхностного слоя металлов и сплавов позволяет заключить, что обработка промышленных материалов импульсными электронными пучками является основой будущих технологий модификации для цели инжиниринга поверхностей деталей и изделий широкого спектра критических применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом / Под ред. Н.Н. Коваля. Новосибирск: Наука, 2018. 176 с. <http://doi.org/10.15372/Sources2018OGE>
2. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н.Н. Коваля, Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 304 с.
3. Иванов Ю.Ф. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 308 с.
4. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V., Kononov S.V. Fatigue of Steels Modified by High Intensity Electron Beams. Cambridge Int. Science Publ., 2015. 272 p.
5. Patent US7049539B2 US. Method for surface treating a die by electron beam irradiation and a die treated thereby / Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P. Publ. May 23, 2006.
6. Murray J.W., Kinnell P.K., Cannon A.H., Bailey B., Clare A.T. Surface finishing of intricate metal mould structures by large-area electron beam irradiation // Precision Engineering. 2013. Vol. 37. No. 2. P. 443–450. <http://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.11.007>
7. Goriainov V., Cook R.B., Murray J.W., Walker J.C., Dunlop D.G., Clare A.T., Oreffo R.O.C. Human skeletal stem cell response to multiscale topography induced by large area electron beam irradiation surface treatment // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2018. Vol. 6. Article 91. <http://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00091>
8. Manufacturing Techniques for Materials. Engineering and Engineered. Srivatsan T.S., Sudarshan T.S., Manigandan K. eds. Taylor and Francis Group, LLC, 2018. 814 p.
9. Okada A., Uno Y., Yabushita N., Uemura K., Raharjo P. High efficient surface finishing of bio-titanium alloy by large-area electron beam irradiation // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 149. No. 1-3. P. 506–511. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.017>
10. Tokunaga J., Kojima T., Kinuta S., Wakabayashi K., Nakamura T., Yatani H., Sohmura T. Large-area electron beam irradiation for surface polishing of cast titanium // Dental Materials Journal. 2009. Vol. 28. No. 5. P. 571–577. <http://doi.org/10.4012/dmj.28.571>
11. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Sano S., Yu Z., Mishima S. A new polishing method of metal mold with large-area electron beam irradiation // Journal of Materials Processing Technology. 2007. Vol. 187-188. P. 77–80. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.080>
12. Okada A., Okamoto Y., Uno Y., Uemura K. Improvement of surface characteristics for long life of metal molds by large-area EB irradiation // Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214. No. 8. P. 1740–1748. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.028>
1. Ozur G.E., Proskurovskii D.I. Sources of Low-Energy High-Current Electron Beams with Plasma Anode. Koval' N.N. ed. Novosibirsk: Nauka, 2018, 176 p. (In Russ.). <http://doi.org/10.15372/Sources2018OGE>
2. Evolution of Surface Layer Structure of Steel Subjected to Electron-Ion-Plasma Treatment. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. eds. Tomsk: Izd-vo NTL, 2016, 304 p. (In Russ.).
3. Ivanov Yu.F. Electron-Ion-Plasma Modification of Surface of Non-Ferrous Metals and Alloys. Tomsk: Izd-vo NTL, 2016, 308 p. (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 Int. Science Publ., 2015, 272 p.
5. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P. Method for surface treating a die by electron beam irradiation and a die treated thereby. Patent US no. US7049539B2. Publ. May 23, 2006.
6. Murray J.W., Kinnell P.K., Cannon A.H., Bailey B., Clare A.T. Surface finishing of intricate metal mould structures by large-area electron beam irradiation. Precision Engineering. 2013, vol. 37, no. 2, pp. 443–450. <http://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.11.007>
7. Goriainov V., Cook R.B., Murray J.W., Walker J.C., Dunlop D.G., Clare A.T., Oreffo R.O.C. Human skeletal stem cell response to multiscale topography induced by large area electron beam irradiation surface treatment. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2018, vol. 6, article 91. <http://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00091>
8. Manufacturing Techniques for Materials. Engineering and Engineered. Srivatsan T.S., Sudarshan T.S., Manigandan K. eds. Taylor and Francis Group, LLC, 2018, 814 p.
9. Okada A., Uno Y., Yabushita N., Uemura K., Raharjo P. High efficient surface finishing of bio-titanium alloy by large-area electron beam irradiation. Journal of Materials Processing Technology. 2004, vol. 149, no. 1-3, pp. 506–511. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.017>
10. Tokunaga J., Kojima T., Kinuta S., Wakabayashi K., Nakamura T., Yatani H., Sohmura T. Large-area electron beam irradiation for surface polishing of cast titanium. Dental Materials Journal. 2009, vol. 28, no. 5, pp. 571–577. <http://doi.org/10.4012/dmj.28.571>
11. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Sano S., Yu Z., Mishima S. A new polishing method of metal mold with large-area electron beam irradiation. Journal of Materials Processing Technology. 2007, vol. 187-188, pp. 77–80. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.080>
12. Okada A., Okamoto Y., Uno Y., Uemura K. Improvement of surface characteristics for long life of metal molds by large-area EB irradiation. Journal of Materials Processing Technology. 2014, vol. 214, no. 8, pp. 1740–1748. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.028>

13. Okada A., Kitada R., Okamoto Y., Uno Y. Surface modification of cemented carbide by EB polishing // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 60. No. 1. P. 575–578. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.107>
14. Shinonaga T., Okada A., Liu H., Kimura M. Magnetic fixture for enhancement of smoothing effect by electron beam melting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 254. P. 229–237. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.024>
15. Okada A., Yonehara H., Okamoto Y. Fundamental study on micro-deburring by large-area EB irradiation // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 5. P. 19–24. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.004>
16. Zhang K., Zou J., Grosdidier T., Dong C., Yang D. Improved pitting corrosion resistance of AISI 316L stainless steel treated by high current pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. No. 3-4. P. 1393–1400. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.008>
17. Ротштейн В.П., Гюнцель Р., Марков А.Б., Проскуровский Д.И., Фам М.Т., Рихтер Э., Шулов В.А. Поверхностная модификация титанового сплава низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком при повышенных начальных температурах // *Физика и химия обработки материалов*. 2006. № 1. С. 62–72.
18. Zhang X.D., Hao S.Z., Li X.N., Dong C., Grosdidier T. Surface modification of pure titanium by pulsed electron beam // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. No. 13. P. 5899–5902. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.136>
19. Zhang K.M., Yang D.Z., Zou J.X., Grosdidier T., Dong C. Improved in vitro corrosion resistance of a NiTi alloy by high current pulsed electron beam treatment // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. No. 6. P. 3096–3102. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.030>
20. Li M.C., Hao S.Z., Wen H., Huang R.F. Surface composite nanostructures of AZ91 magnesium alloy induced by high current pulsed electron beam treatment // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 303. P. 350–353. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.004>
21. Uvarov A., Uemura K., Alexandrov S., Murayama H., Soba R. Molecular properties characterization of PTFE films deposited by Hot Wire CVD // *Session report. 16th Symposium on High Current Electronics and 10th Conference on Materials Modification*. Tomsk, September 19-24, 2010. Tomsk, 2010. P. 500–503.
22. Batrakov A.V., Onischenko S.A., Kurkan I.K., Rostov V.V., Yakovlev E.V., Nefedsev E.V., Tsygankov R.V. Comparative study of breakdown strength of vacuum insulation in gaps with electron-beam polished electrodes under pulsed DC and microwave electric fields // *Proceedings of 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. 2018. Vol. 1. P. 77–80. <http://doi.org/10.1109/deiv.2018.8537014>
23. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E. Use of low-energy, high-current electron beams for surface treatment of materials // *Surface and Coatings Technology*. 1997. Vol. 96. No. 1. P. 117–122. [http://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00093-5](http://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00093-5)
24. Cai J., Lv P., Guan Q., Xu X., Lu J., Wang Z., Han Z. Thermal cycling behavior of thermal barrier coatings with MCrAlY bond coat irradiated by high-current pulsed electron beam // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2016. Vol. 47. No. 8. P. 32541–32556. <http://doi.org/10.1021/acsami.6b11129>
25. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Гришунин В.А., Тересов А.Д., Коновалов С.В. Структура поверхностного слоя и усталостная долговечность рельсовой стали, облученной высокоинтенсивным электронным пучком // *Физическая мезомеханика*. 2013. Т. 16. № 2. С. 47–53.
26. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Гришунин В.А., Коновалов С.В. Электронно-пучковая обработка рельсовой стали: фазовый состав, структура, усталостная долговечность // *Вопросы материаловедения*. 2013. Т. 73. № 1. С. 20–30.
27. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Гришунин В.А., Райков С.В., Коновалов С.В. Масштабные уровни структурно-фазовых состояний и усталостная долговечность рельсовой стали после электронно-пучковой обработки // *Успехи физики металлов*. 2013. Т. 14. № 1. С. 67–80.
13. Okada A., Kitada R., Okamoto Y., Uno Y. Surface modification of cemented carbide by EB polishing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2011, vol. 60, no. 1, pp. 575–578. <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.107>
14. Shinonaga T., Okada A., Liu H., Kimura M. Magnetic fixture for enhancement of smoothing effect by electron beam melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018, vol. 254, pp. 229–237. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.024>
15. Okada A., Yonehara H., Okamoto Y. Fundamental study on micro-deburring by large-area EB irradiation. *Procedia CIRP*. 2013, vol. 5, pp. 19–24. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.004>
16. Zhang K., Zou J., Grosdidier T., Dong C., Yang D. Improved pitting corrosion resistance of AISI 316L stainless steel treated by high current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2006, vol. 201, no. 3-4, pp. 1393–1400. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.008>
17. Rotshtein V.P., Gyuntsel' R., Markov A.B., Proskurovskii D.I., Fam M.T., Rikhter E., Shulov V.A. Surface modification of a titanium alloy with low-energy high-current electron beam at elevated initial temperatures. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2006, vol. 1, pp. 62–72. (In Russ.).
18. Zhang X.D., Hao S.Z., Li X.N., Dong C., Grosdidier T. Surface modification of pure titanium by pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2011, vol. 257, no. 13, pp. 5899–5902. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.136>
19. Zhang K.M., Yang D.Z., Zou J.X., Grosdidier T., Dong C. Improved in vitro corrosion resistance of a NiTi alloy by high current pulsed electron beam treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2006, vol. 201, no. 6, pp. 3096–3102. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.030>
20. Li M.C., Hao S.Z., Wen H., Huang R.F. Surface composite nanostructures of AZ91 magnesium alloy induced by high current pulsed electron beam treatment. *Applied Surface Science*. 2014, vol. 303, pp. 350–353. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.004>
21. Uvarov A., Uemura K., Alexandrov S., Murayama H., Soba R. Molecular properties characterization of PTFE films deposited by Hot Wire CVD. In: *Session report. 16th Symposium on High Current Electronics and 10th Conference on Materials Modification*. Tomsk, September 19-24, 2010. Tomsk, 2010, pp. 500–503.
22. Batrakov A.V., Onischenko S.A., Kurkan I.K., Rostov V.V., Yakovlev E.V., Nefedsev E.V., Tsygankov R.V. Comparative study of breakdown strength of vacuum insulation in gaps with electron-beam polished electrodes under pulsed DC and microwave electric fields. *Proceedings of 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. 2018, vol. 1, pp. 77–80. <http://doi.org/10.1109/deiv.2018.8537014>
23. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E. Use of low-energy, high-current electron beams for surface treatment of materials. *Surface and Coatings Technology*. 1997, vol. 96, no. 1, pp. 117–122. [http://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00093-5](http://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00093-5)
24. Cai J., Lv P., Guan Q., Xu X., Lu J., Wang Z., Han Z. Thermal cycling behavior of thermal barrier coatings with MCrAlY bond coat irradiated by high-current pulsed electron beam. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2016, vol. 47, no. 8, pp. 32541–32556. <http://doi.org/10.1021/acsami.6b11129>
25. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Grishunin V.A., Teresov A.D., Kononov S.V. Surface layer structure and fatigue life of rail steel irradiated by a high-intensity electron beam. *Physical Meso-mechanics*. 2013, vol. 16, no. 2, pp. 47–53. (In Russ.).
26. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Grishunin V.A., Kononov S.V. Rail steel treated by electron beam, its phase composition, structure, and fatigue life. *Voprosy materialovedeniya*. 2013, vol. 73, no. 1, pp. 20–30. (In Russ.).
27. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Grishunin V.A., Raikov S.V., Kononov S.V. Scale levels of the structure-phase states and fatigue life of rail steel after electron-beam treatment. *Uspekhi fiziki metallov*. 2013, vol. 14, no. 1, pp. 67–80. (In Russ.).

28. Gao B., Hu L., Li S.-W., Hao Y., Zhang Y.-D., Tu G.-F., Grosdidier T. Study on the nanostructure formation mechanism on the hypereutectic Al–17Si alloy induced by pulsed electron beam // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 346. P. 147–157. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.029>
29. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М., Коновалов С.В., Алсараева К.В. Эволюция структуры силумина, подвергнутого обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и последующему усталостному нагружению до разрушения // *Известия РАН. Серия физическая*. 2015. Т. 79. № 9. С. 1169–1172. <http://doi.org/10.3103/S1062873815090087>
30. Kim J.S., Lee W.J., Park H.W. The state of the art in the electron beam manufacturing processes // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2016. Vol. 17. No. 11. P. 1575–1585. <http://doi.org/10.1007/s12541-016-0184-8>
31. Иванов Ю.Ф., Итин В.И., Лыков С.В., Марков А.Б., Ротштейн В.П., Тухфатуллин А.А., Дикий Н.П. Структурный анализ зоны термического влияния стали 45, обработанной низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком // *Физика металлов и металловедение*. 1993. Т. 75. № 5. С. 103–112.
32. Марков А.Б., Ротштейн В.П. Расчет и экспериментальное определение размеров зон упрочнения и отпуска в закаленной стали У7А, облученной импульсным электронным пучком // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 1998. № 4. С. 83–89.
33. *Structure and Properties of Metals at Different Energy Effects and Treatment Technologies*. Klimentov V.A., Starenchenko V.A. eds. Switzerland: Trans. Tech. Publications Ltd., 2014. 324 p.
34. Ivanov Yu.F., Zagulyaev D.V., Nevskii S.A., Gromov V.E., Sarychev V.D., Semin A.P. Microstructure and properties of hypoeutectic silumin treated by high-current pulsed electron beams // *Progress in Physics of Metals*. 2019. Vol. 20. No. 3. P. 451–490. <http://doi.org/10.15407/ufm.20.03.447>
28. Gao B., Hu L., Li S.-W., Hao Y., Zhang Y.-D., Tu G.-F., Grosdidier T. Study on the nanostructure formation mechanism on the hypereutectic Al–17Si alloy induced by pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2015, vol. 346, pp. 147–157. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.029>
29. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kononov S.V., Alsarayeva K.V. Structural evolution of silumin treated with a high intensity pulse electron beam and subsequent fatigue loading up to failure. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences-Physics*. 2015, vol. 79, no. 9, pp. 1169–1172. <http://doi.org/10.3103/S1062873815090087>
30. Kim J.S., Lee W.J., Park H.W. The state of the art in the electron beam manufacturing processes. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2016, vol. 17, no. 11, pp. 1575–1585. <http://doi.org/10.1007/s12541-016-0184-8>
31. Ivanov Yu.F., Itin V.I., Lykov S.V., Markov A.B., Rotshtein V.P., Tukhfatullin A.A., Dikii N.P. Structural analysis of heat-affected zone of steel 45 treated by low-energy high-current electron beam. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1993, vol. 75, no. 5, pp. 103–112. (In Russ.).
32. Markov A.B., Rotshtein V.P. Calculation and experimental determination of size of hardening and tempering zones in hardened U7A steel irradiated with a pulsed electron beam. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 1998, vol. 4, pp. 83–89. (In Russ.).
33. *Structure and Properties of Metals at Different Energy Effects and Treatment Technologies*. Klimentov V.A., Starenchenko V.A. eds. Switzerland: Trans. Tech. Publ. Ltd., 2014, 324 p.
34. Ivanov Yu.F., Zagulyaev D.V., Nevskii S.A., Gromov V.E., Sarychev V.D., Semin A.P. Microstructure and properties of hypoeutectic silumin treated by high-current pulsed electron beams. *Progress in Physics of Metals*. 2019, vol. 20, no. 3, pp. 451–490. <http://doi.org/10.15407/ufm.20.03.447>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
ORCID: 0000-0003-0271-5504
E-mail: yufi55@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Дмитрий Валерьевич Загуляев, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-9859-8949
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: ksv@ssau.ru

Юлия Андреевна Рубанникова, магистрант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher, Institute of High Current Electronics, SB RAS
ORCID: 0000-0003-0271-5504
E-mail: yufi55@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-5147-5343
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Dmitrii V. Zagulyaev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-9859-8949
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Sergei V. Kononov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: ksv@ssau.ru

Yuliya A. Rubannikova, MA Student of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2020
 После доработки 25.02.2020
 Принята к публикации 02.03.2020

Received 22.01.2020
 Revised 25.02.2020
 Accepted 02.03.2020