



## РАЗДЕЛ 3. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Обзорная статья

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 53.097:54-116

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.017

### АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ ЧАСТЬ 1

Дмитрий Валерьевич Комаров <sup>1</sup>, Сергей Валерьевич Коновалов <sup>2</sup>,  
Дмитрий Владимирович Жуков <sup>3</sup>, Илья Сергеевич Виноградов <sup>4</sup>,  
Ирина Алексеевна Панченко <sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Самара, Россия

<sup>1, 3, 4</sup> Инженерно-технический центр-филиал ООО «Газпром трансгаз Самара», Самара, Россия

<sup>5</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

<sup>1</sup> komarov\_dimitriy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-2021>

<sup>2</sup> ksv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

<sup>3</sup> dzetii@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3709-1415>

<sup>4</sup> I.Vinogradov@samaratransgaz.gazprom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2011-9781>

<sup>5</sup> i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

**Аннотация.** Продление ресурса металлических деталей и конструкций, а также обеспечение надежности и безопасности их работы неразрывно связано с технологиями, применяемыми на стадии изготовления. Предъявляемые сегодня требования к новым изделиям как со стороны эксплуатации, так и с точки зрения экологичности и экономичности их производства, не позволяют решать поставленные задачи с использованием только традиционных технологий. В этом аспекте развитие физического материаловедения в последние годы стало возможным благодаря выходу на новый уровень возможности электронно-лучевых установок, применяемых для упрочнения поверхности изделий из различных сплавов электронно-пучковой обработкой (ЭПО).

В статье выполнен анализ исследовательских работ в области применения электронных пучков как самостоятельного способа обработки, так и в составе с другими технологиями, позволяющими модифицировать поверхностные слои металлических деталей и изделий с целью улучшения их механических и эксплуатационных свойств. В первой части работы указаны основные преимущества ЭПО перед другими технологиями, в основе которых лежат концентрированные потоки энергии. Отмечена невысокая точность существующих математических моделей, предназначенных для аналитической оценки теплового поля поверхностных слоев металлических многокомпонентных сплавов, обрабатываемых электронными пучками, что требует проведения длительных и дорогостоящих исследований влияния режимов облучения на физико-химическое состояние материала. Выполнен анализ трудов авторских коллективов из РФ за последние 10 лет, посвященные ЭПО поверхностных слоев сталей, титановых и алюминиевых сплавов с применением классической термообработки или без нее. Анализ показал, что метод применим для обработки широкой номенклатуры металлических материалов и позволяет после применения существенно повысить механические и усталостные характеристики обрабатываемых изделий.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийные сплавы, традиционные сплавы, микроструктура, электронно-пучковая обработка (ЭПО), механические свойства.

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках конкурса Минобрнауки на создание новых молодежных лабораторий «Научно-исследовательская лаборатория ЭМиОИ».

**Для цитирования:** Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 1 / Д. В. Комаров [и др.]. // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 129–139. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.017.

Original article

## ANALYSIS OF THE CURRENT SITUATION IN THE FIELD OF APPLICATION OF ELECTRON-BEAM PROCESSING OF VARIOUS ALLOYS. PART 1

Dmitrij V. Komarov <sup>1</sup>, Sergej V. Konovalov <sup>2</sup>, Dmitrij V. Zhukov <sup>3</sup>, Il'ya S. Vinogradov <sup>4</sup>, Irina A. Panchenko <sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

<sup>1, 3, 4</sup> Engineering and technical center-branch of Gazprom transgaz Samara LLC, Samara, Russia

<sup>5</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

<sup>1</sup> komarov\_dimitriy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-2021>

<sup>2</sup> ksv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

<sup>3</sup> dzetii@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3709-1415>

<sup>4</sup> I.Vinogradov@samaratransgaz.gazprom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2011-9781>

<sup>5</sup> i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

**Abstract.** *Extension of the service life of metal parts and structures, as well as ensuring the reliability and safety of their work, is inextricably linked with the technologies used at the manufacturing stage. The requirements imposed today on new products, both from the side of operation and from the point of view of environmental friendliness and economic efficiency of their production, do not allow solving the assigned tasks using only traditional technologies. In this aspect, the development of physical materials science in recent years has become possible due to the achievement of a new level of capabilities of electron-beam installations used to harden the surface of products from various alloys by electron-beam processing (EBP).*

*In the article, in two parts, the analysis of research work in the field of application of electron beams is carried out, both as an independent method of processing, and in combination with other technologies that allow modifying the surface layers of metal parts and products in order to improve their mechanical and operational properties. In the first part of the work, the main advantages of EBP over other technologies based on concentrated energy flows are indicated. The low accuracy of the existing mathematical models intended for the analytical assessment of the thermal field of the surface layers of metal multicomponent alloys processed by electron beams is noted, which requires long-term and expensive studies of the effect of irradiation modes on the physicochemical state of the material. The analysis of the works of authors' teams from the Russian Federation for the last 10 years, devoted to the EBP of the surface layers of steels, titanium and aluminum alloys with the use of classical heat treatment or without it, has been carried out. The analysis showed that the method is applicable for processing a wide range of metallic materials and allows, after application, to significantly increase the mechanical and fatigue characteristics of the processed products.*

**Keywords:** *high-entropy alloys, traditional alloys, microstructure, electron-beam processing (EBP), mechanical properties.*

**Acknowledgments:** *The research was carried out within the framework of the competition of the Ministry of Education and Science for the creation of new youth laboratories "Research Laboratory of EMIOI".*

---

**For citation:** Komarov, D. V., Konovalov, S. V., Zhukov, D. V., Vinogradov, I. S. & Panchenko, I. A. (2021). Analysis of the current situation in the field of application of electron-beam processing of various alloys. Part 1. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 129-139. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.017.

---

### ВВЕДЕНИЕ

В отличие от физических и физико-химических свойств металлических материалов, определяемых в основном их природой и слабо зависящих от микроструктуры (кроме

ферромагнетиков), механические свойства являются структурно-чувствительными. Поэтому модификация микроструктуры металлов и сплавов неизбежно приводит к эволюции всего комплекса их механических харак-

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ. ЧАСТЬ 1

теристик, а также к изменению эксплуатационных свойств.

Уже долгие годы одним из исследуемых направлений повышения технологических и эксплуатационных параметров металлических деталей и изделий является применение технологий упрочнения их поверхностных слоев, основанных на создании в этих областях сопротивления движущимся под действием внешних напряжений дислокациям. К традиционным технологиям данного направления относятся легирование, рафинирование, термическая и механическая обработки. Кроме того, в материаловедении широко изучена и технология химико-термической обработки, применяемая для изменения химического и фазового состава, структуры и свойств поверхностных слоев металлов и сплавов.

Однако постоянная потребность в новых материалах, обусловленная усложнением создаваемой техники, стремлением получить для нее более высокие параметры и коэффициент полезного действия (КПД), необходимостью повышения надежности и безопасности ее работы, а также ростом требований по снижению материалоемкости и экологичности процессов изготовления деталей и изделий, зачастую не может быть реализована за счет традиционных технологий.

Решение задач по обеспечению необходимого комплекса эксплуатационных свойств, предъявляемых к новым деталям и изделиям, стало возможным за счет развития области нетрадиционных способов обработки металлических материалов с применением радиационно-пучковых технологий (РПТ). Сегодня к РПТ принято относить ионно-пучковые, плазменные и ионно-плазменные технологии, а также методы обработки, основанные на использовании концентрированных потоков энергии. В основе их использования лежит применение тепловой, кинетической, электрической и магнитной составляющих энергии, а также различные способы ее подвода к обрабатываемому твердому телу (мишени): непрерывный, импульсный, импульсно-периодический, точечный, линейный, поверхностный, квазиобъемный.

В зависимости от параметров радиационного воздействия использование РПТ позволяет получать различные структурно-фазовые изменения материалов, основными из которых являются [1]:

- увеличение параметра кристаллической решетки;
- разворот плоскостей упаковки атомов;
- образование аморфной и ультрадисперсной фаз;

- накопление радиационных дефектов;
- диспергирование микроструктуры;
- создание пересыщенных твердых растворов;
- образование слоистых структур;
- расслоение твердых растворов, упорядочивание;
- образование градиентных структурно-фазовых состояний и др.

Подробное рассмотрение каждой из РПТ, а также описание сопровождающих их физических процессов, благодаря которым происходит модифицирующее воздействие обрабатываемых материалов, является объемной задачей. В настоящей статье подробно будет обсуждаться только технология, основанная на использовании концентрированных потоков энергии (КПЭ), а именно электронно-пучковая обработка (ЭПО).

Сущность процесса ЭПО заключается в преобразовании кинетической энергии потока электронов, сформированных в вакууме, в тепловую энергию в зоне взаимодействия с обрабатываемым твердым телом.

Основными преимуществами указанного метода перед другими технологиями КПЭ являются: высокий контроль и регулирование количества подводимой к мишени энергии, создание большой площади воздействия концентрированного потока энергии на обрабатываемый материал, малые коэффициенты отражения энергии, высокая концентрация энергии в единице объема, что позволяет в широком диапазоне варьировать температуру в области взаимодействия электронного пучка и мишени для перевода обрабатываемого материала в высоконерасовнованное состояние [1–3].

Наиболее развиваемыми направлениями технологического применения электронных пучков в настоящее время являются:

- размерная обработка и резка изделий [4–7];
- электронно-лучевая сварка [7–11];
- электронно-лучевая плавка различных материалов, наплавка и ликвидация покрытий [12–14];
- модифицирующая обработка поверхности слоев материала мишеней [15–17].

Целью настоящей статьи является описание результатов исследований, выполненных по последнему из указанных выше направлений.

Необходимо отметить, что использование ЭПО для модификации поверхностных слоев различных металлов и сплавов за последние тридцать лет широко исследовалось как в нашей стране, так и за рубежом. Однако при этом работа в этом направлении до сих

пор является перспективной. Это обусловлено высокой эффективностью метода при получении новых уникальных физико-механических свойств обрабатываемых материалов, а, как следствие, формирование требуемых эксплуатационных свойств при обработке твердых тел, изготовленных из металлов и сплавов. Данный аспект был подтвержден в ходе многочисленных исследований и более подробно будет рассмотрен в статье. Кроме того, на сегодняшний момент отсутствует общая физическая модель, которая могла бы полностью охватить взаимодействие электронного пучка с твердым телом в зависимости от параметров излучения и свойств облучаемого материала.

Взаимодействие между ускоренными электронами и материалом мишени является сложным процессом. Как правило, одним из основных его результатов представляет собой изменение теплового поля в приповерхностных слоях обрабатываемого твердого тела, которое может сопровождаться нагревом, плавлением, испарением и структурно-фазовыми превращениями материала в зависимости от его свойств и условий обработки.

С одной стороны, расчетные оценки изменения температуры в отдельных точках мишени со временем при ее нагреве и последующем охлаждении позволяют прогнозировать возможное изменение состава материала, его структурно-фазовое состояние после обработки, и, как следствие, в первом приближении подбирать требуемые режимы работы установки (плотность энергии в электронном пучке, время воздействия, энергия электронов и т.д.).

С другой стороны, необходимо понимать, что существующие математические модели расчета пространственно-временных характеристик теплового поля имеют целый ряд допущений. К ним можно отнести: пренебрежение потерями теплоты посредством конвекции и лучеиспускания, принятие материала мишени изотропным, а источника теплоты поверхностным, признание несущественной разницы между значениями температуры и ее производными (скорости нагрева и охлаждения, пространственные градиенты) и др. Учет же указанных характеристик требует решать задачи о нагреве твердых тел при помощи нелинейных математических моделей. Как правило, они не дают точного результата, температура в таких случаях может быть определена только методами численного решения или приближенными аналитическими методами.

Еще более сложной задачей является аналитическая оценка механических и экс-

плуатационных свойств материала после его упрочнения электронным пучком. Так, например, при импульсной ЭПО поверхности металлов и сплавов со средней плотностью пучка  $10^5$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> упрочнение происходит по двум механизмам: поверхностному (за счет быстрой закалки) и подповерхностному (объемному) под действием волновых напряжений [1]. За счет быстрого нагрева и охлаждения поверхности мишени изменяется структурно-фазовое состояние, а вследствие ударно-волнового воздействия трансформируется дислокационная структура. Степень же реального упрочнения будет определяться вкладом каждого из механизмов, что определить расчетным путем с высокой точностью для различных материалов и режимов обработки не представляется возможным.

Таким образом, одним из главных недостатков технологии ЭПО является ее высокая наукоемкость, обусловленная необходимостью проведения длительных и дорогостоящих исследований влияния режимов облучения на физико-химическое состояние материала в поверхностных слоях деталей и изделий. Именно поэтому широкое внедрение указанной технологии в промышленное производство возможно только благодаря проведению большого объема прикладных научных исследований, обобщению и систематизации их результатов, а также публикации полученных материалов в широком доступе в научных изданиях.

Изучение влияния ЭПО на металлы и сплавы в настоящее время является важной задачей, работа над которой ведется как в РФ, так и за ее пределами. В рассматриваемой статье приведены результаты научно-исследовательских работ, выполненных различными авторскими коллективами по вопросу применимости технологии ЭПО для широкой номенклатуры металлических материалов за последние 10 лет. Поставлена актуальная задача по изучению модифицирующего воздействия импульсного электронного луча на никелевые жаропрочные сплавы без защитных покрытий.

## **ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЭПО ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 ЛЕТ**

Получение производителями электронно-пучковых установок с высокой плотностью энергии в сочетании с низким ускоряющим напряжением, высокой энергетической эффективностью, широким диапазоном регулировки параметров и хорошей воспроизводимостью импульсов интенсифицировало как в

*ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2021*

РФ, так и за ее пределами исследования в области модификации поверхностных слоев различных материалов с помощью электронных пучков.

Анализ публикаций отечественных авторов за последние 10 лет позволяет выделить несколько направлений, по которым развивалось применение ЭПО с целью модификации поверхности твердых тел, выполненных из различных металлов и сплавов:

- ЭПО поверхностных слоев с применением классической термообработки или без нее;
- ЭПО поверхностных слоев после электровзрывного легирования;
- ЭПО поверхностных слоев после наплавки;
- ЭПО поверхностных слоев аддитивных сплавов.

Выполненные научные исследования структурно-фазового состояния модифицированных электронным пучком образцов-свидетелей с помощью методов современного материаловедения, а также определение механических характеристик и проведение испытаний по установлению некоторых эксплуатационных свойств как до, так и после проведения ЭПО, позволили не только принципиально подтвердить применимость указанной технологии к различным металлам и сплавам, но и определить оптимальные режимы электронного пучка в каждом рассматриваемом случае.

Большинство имеющихся на сегодняшний день работ посвящено изучению модифицирующего влияния ЭПО на стали, титановые и алюминиевые сплавы, реже рассматриваются сплавы на никелевой и медной основе.

При обзоре исследовательских работ в статье использованы следующие обозначения режимов электронных пучков:  $eU$  – энергия электронов, кэВ  $t$  – длительность воздействия электронного пучка электронов, мкс;  $N$  – количество импульсов воздействия, шт.;  $f$  – частота следования импульсов,  $c^{-1}$ ;  $E_s$  – плотность энергии пучка электронов, Дж/см<sup>2</sup>,  $q_e$  – плотность мощности, ГВт/м<sup>2</sup>.

### ЭПО ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ИЛИ БЕЗ НЕЕ

В п. 2 проанализированы результаты исследований, полученные после модификации поверхностных слоев с помощью ЭПО таких традиционных материалов, как стали, алюминиевых и титановых сплавов. Отражены основные изменения микроструктуры, сфор-

мированные за счет воздействия электронных пучков, а также приведены данные о некоторых прочностных и трибологических характеристиках материалов после обработки.

### ЭПО СТАЛЕЙ

ЭПО ( $t = 50$  мкс,  $N = 3$ ,  $f = 0,3$   $c^{-1}$ , 10 Дж/см<sup>2</sup>, 20 Дж/см<sup>2</sup> и 30 Дж/см<sup>2</sup>) рельсовой стали Э76Ф (зарубежных аналогов нет) позволило в 2,5 раза увеличить усталостную долговечность рассматриваемого материала при плотности энергии пучка  $E_s = 20$  Дж/см<sup>2</sup> [18]. Обусловлено это тем, что концентраторы напряжений, приводящие к возникновению трещин на необработанных образцах, располагаются на поверхности. В то время как концентраторы в обработанных образцах находятся в подслое с большим количеством микропор. Располагается он на границе раздела слоя высокоскоростной кристаллизации и слоя термического влияния. Коллективом авторов установлено, что при большей плотности пучка (20 и 30 Дж/см<sup>2</sup>) размеры пор оказывались существенно меньше, чем при плотности в  $E_s = 10$  Дж/см<sup>2</sup>, строки пор выражались менее явно, располагались на определенном расстоянии от поверхности. Но при этом уровень усталостной долговечности стали, обработанной при  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup>, оказался ниже даже исходного состояния материала (рисунок 1), что было обусловлено высокими остаточными напряжениями, сформированными в модифицированном слое при обработке.

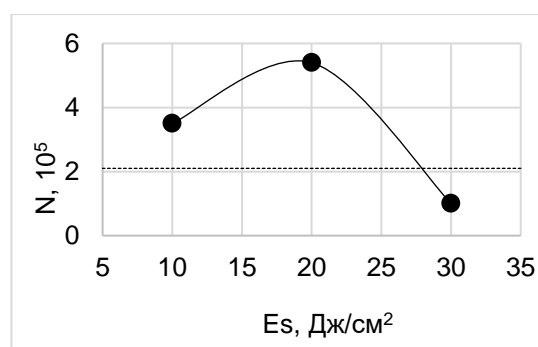


Рисунок 1 – Зависимость числа циклов образцов до разрушения  $N$  от плотности энергии пучка электронов  $E_s$ . Пунктирной прямой отмечена величина усталостной долговечности стали в исходном состоянии (до ЭПО) [18]

Figure 1 - Dependence of the number of cycles of samples before destruction  $N$  on the energy density of the electron beam  $E_s$ . The dotted line marks the value of the fatigue life of steel in the initial state (before EBP) [18]

Исследование структуры поверхностного слоя нержавеющей стали 08X18H10T (зарубежные аналоги: S32100 – США, X6 CrNiTi 18-10 – Германия, Z 6 CN 18-10 – Франция, 321 S 30 – Великобритания, SUS 321 – Япония), полученной после обработки высокоинтенсивным электронным пучком в условиях многоциклового усталости [19], проводилась на режиме, соответствующем начальной стадии плавления материала ( $eU = 18$  кэВ,  $\tau = 50$  мкс,  $N = 3$ ,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $E_s = 15$  Дж/см<sup>2</sup>).

Установлено, что ЭПО стали на указанном режиме приводит к формированию многослойной микроструктуры. В структуре лицевой поверхности выявлены кристаллы  $\epsilon$ -мартенсита с микротрещинами вдоль их границ раздела. В объеме переходного слоя выявлены области материала, не способные к дальнейшей эволюции в условиях пластической деформации, что служит в большинстве своем причиной возникновения и роста микротрещин. Также установлен факт наличия микропор и микротрещин на границе раздела поверхностного и переходного слоев.

При этом усталостная долговечность модифицированных образцов электронным пучком оказалась приблизительно в 1,5 раза выше, чем образцов в исходном состоянии. Причиной такого прироста стало растворение частиц карбидной фазы в поверхностном слое, достигнутое в ходе обработки. Также выявлено уменьшение средних размеров и плотности карбида  $M_{23}C_6$  по мере приближения к модифицированной поверхности.

ЭПО ( $eU = 18$  кэВ,  $\tau = 50$  мкс,  $N = 3$ ,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $E_s = 10$  Дж/см<sup>2</sup>) жаропрочной хромистой стали мартенситного класса 20X13 (зарубежные аналоги: S 42000 – США, X 20 Cr13 – Германия и Франция, 420 S 37 – Великобритания, SUS 420J1 – Япония) в режиме оплавления поверхности после предварительной закалки приводит, во-первых, к устранению поверхностных дефектов после механической обработки, во-вторых, к формированию микрократеров, располагающихся, в основном, строчками, в-третьих, к существенному измельчению зерен поверхностного слоя с размером  $\approx 3$  мкм.

Благодаря воздействию электронного луча в режиме оплавления, на поверхности формировалась градиентная многофазная структура. Толщина поверхностного слоя составила не менее 5 мкм, которая характеризовалась структурой с мелким зерном, а также наличием многофазной структуры, сформированной вдоль границы раздела карбид  $M_{23}C_6$ /матрица. В зоне термического влияния на глубине  $\approx 20$  мкм выявлена структура с высоким уровнем внутренних напряжений.

После ЭПО усталостный ресурс предварительно закаленной стали 20X13 по указанному режиму увеличился в 1,4 раза.

ЭПО ( $eU = 25$  кэВ,  $\tau = 60$  мкс,  $N = 1$ ,  $E_s = 70$  Дж/см<sup>2</sup>) инструментальной стали У7А (зарубежные аналоги: С 70 U – Германия, ХС 65 FINS – Франция, СТ 70 – Евронормы), благодаря высокоскоростной закалке способствовала измельчению в приповерхностном слое размеров зерен. Причем данный аспект способствовал изменению морфологии кристаллов мартенсита. Так, соотношение поперечных размеров зерен к продольным в модифицированном слое после электронного луча составило 1:4, тогда как после закалки в печи данное соотношение составляет 1:10. Также высокоскоростная закалка привела к формированию вблизи границ зерен областей, в которых кристаллы мартенсита оказались фрагментированы. В некоторых областях вблизи границы зерен наблюдалось образование кристаллов мартенсита, растущих параллельно границе [20].

Необходимо отметить, что в исходном состоянии сталь характеризовалась неоднородным распределением углерода. Проведение ЭПО в режиме устойчивого плавления поверхностного слоя не обеспечило гомогенизацию расплава, т.е. к равномерному распределению углерода в жидкой фазе. Данный аспект привел к формированию мартенситно-аустенитной структуры с неравномерной объемной долей остаточного аустенита в зоне облучения.

ЭПО ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (16X12B2ФТaP) (зарубежных аналогов нет) выполнялась электронными пучками с плотностью энергии от 10 до 30 Дж/см<sup>2</sup> и числом импульсов от 1 до 3 [21].

По результатам исследования удалось установить, что изменение структурно-фазового состояния поверхностных слоев сплава происходит в достаточно узком уровне плотностей энергии. Обработка поверхности образцов приводила к образованию субмикроструктурной структуры феррита со значением твердости, превышающей материал в исходном состоянии. Однако толщина упрочненного слоя не превышала 10 мкм, что, в свою очередь, практически не оказывало влияние на прочностные свойства сплава при одноосном растяжении. Также благодаря проведению отжига при 700 °С удалось установить, что поверхностные зерна, образовавшиеся после модификации поверхности, не являются термически стабильными. После отжига зерна выросли с 200 до 370 нм, что сопровождалось уменьшением твердости поверхностного слоя.

### ЭПО ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Поговорим теперь о некоторых результатах модификации титановых и алюминиевых сплавов, полученных за последние годы с помощью ЭПО.

Обработка электронными пучками ( $eU = 115\text{--}120$  кэВ,  $\tau = 30$  мкс,  $N > 2$ ,  $E_s = 18\text{--}20$  Дж/см<sup>2</sup>) титанового сплава ВТ6 (зарубежные аналоги: WNr – Германия, JIS – Япония, AFNOR – Франция, BS – Великобритания) в режиме плавления способствовало формированию в поверхностном слое текстуры сжатия (толщина до 20 мкм) и мелкодисперсной глобулярно-пластинчатой микроструктуры с преимущественной ориентацией  $\alpha$ -,  $\alpha'$ - и  $\alpha''$ -пластин параллельно или почти параллельно поверхности [22]. Полученная тонкодисперсная микроструктура с повышенной плотностью дислокаций и текстурой сжатия способствует повышению усталостной прочности исследуемого титанового сплава при испытаниях на изгиб.

ЭПО ( $eU = 16$  кэВ,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 3$ ,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $E_s = 10\text{--}30$  Дж/см<sup>2</sup>) чистого титанового сплава ВТ1-0 (зарубежные аналоги: Grade 2 – США, Ti2 – Германия, Ti-P.02 – Франция, CP – Великобритания) способствовала образованию на поверхности образцов многослойной микроструктуры [23]. Верхний слой представлял собой пластинчатую структуру (толщина составила  $\approx 10$  мкм), ниже лежащий слой имел смешанную структуру пластин и субзерен (толщина составила  $\approx 10$  мкм), слой, расположенный на глубине 30–40 мкм от поверхности, в основном, имел субзеренную структуру. Облучение интенсивным электронным пучком позволило увеличить усталостную долговечность в среднем в 2,2 раза (рисунок 2) за счет образования глобулярной структуры при высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя.

Обработка сильноточными импульсными электронными пучками (СИЭП) ( $eU = 120$  кэВ,  $\tau = 30$  мкс,  $N = 1$ ,  $E_s = 18\text{--}20$  Дж/см<sup>2</sup>) титановых сплавов ВТ4 и ВТ20 (зарубежных аналогов нет) позволило сформировать в поверхностных слоях конусообразных образцов остаточные сжимающие напряжения [24].

Причем такой эффект наблюдался при одновременном облучении всех сторон и не зависел от режима обработки СИЭП. Важно отметить, что остаточные сжимающие напряжения в поверхностных слоях изделий, испытывающих многоцикловые нагрузки в процессе эксплуатации, являются благоприятными. Для их получения на производстве зачастую применяются дополнительные технологические операции.

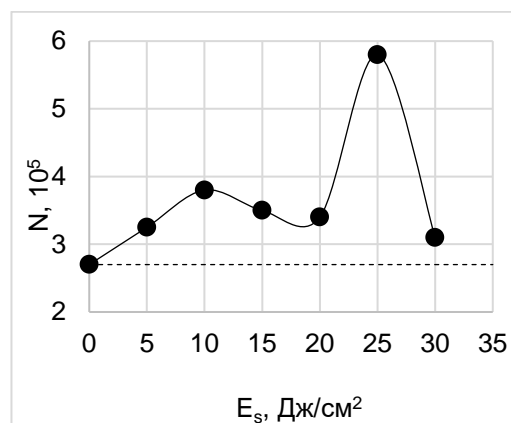


Рисунок 2 – Зависимость среднего (усреднение выполнено по пяти образцам) числа циклов до разрушения  $N$  от плотности энергии пуска электронов  $E_s$ . Значения усталостного ресурса исходного материала обозначены пунктирной линией [23]

Figure 2 - Dependence of the average (averaging was performed over five samples) number of cycles to destruction  $N$  on the energy density of the start-up of electrons  $E_s$ .

The fatigue life values of the starting material are indicated by the dashed line [23]

### ЭПО АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

ЭПО ( $eU = 16$  кэВ,  $\tau = 150$  мкс,  $N_1 = 1$ ,  $N_2 = 5$ ,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $E_s = 20$  Дж/см<sup>2</sup>) силумина АК12 (зарубежные аналоги: G-AlSi12 – Германия, S-S13 – Франция) привело к формированию в поверхностном слое образцов структуры ячеистой кристаллизации со средним размером ячеек 450 нм, между ячейками располагались прослойки кремния [25].

Облучение электронным пучком позволило увеличить усталостную долговечность сплава до 7,9 раз. Источниками усталостных микротрещин выступили пластины кремния малых размеров, не растворившихся при проведении ЭПО.

В работе [26] исследовались морфология и микротвердость поверхности алюминиевого сплава АК5М2 (зарубежные аналоги: А.319.0 – США, А-S5U3G – Франция), облученного электронным пучком на различных режимах:  $eU = 17$  кэВ,  $\tau = 50$  и 200 мкс,  $N = 3$ ,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $E_s = 10, 20, 30, 40$  и 50 Дж/см<sup>2</sup>.

Установлено, что ЭПО на режимах  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 200$  мкс и  $E_s = 50$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 50$  мкс способствовала максимальному значению микротвердости до 860–950 МПа (рисунок 3). Морфология поверхности на первом из указанных режимов характеризуется

многочисленными микротрещинами и микропорами, причинами которых, наиболее вероятно, является усадка материала при его высокоскоростной кристаллизации. Облучение поверхности сплава на втором режиме способствовало полному растворению в поверхностном слое частиц интерметаллидов и кремния, плотность трещин на поверхности относительно первого режима была существенно меньше. В объеме зеренной структуры наблюдались ячейки кристаллизации с размерами от 500 до 800 нм, что, по мнению авторов, и привело к увеличению прочностных свойств поверхностного слоя образцов.

Обработка электронными пучками сплава АК10М2Н (зарубежных аналогов нет) на 6 режимах ( $eU = 17$  кэВ,  $\tau = 150$  мкс,  $N = 3$ ,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $E_s = 10, 20, 30, 40, 50, 60$  Дж/см<sup>2</sup>) позволила сделать выводы о влиянии плотности энергии пучка электронов на структуру и механические характеристики поверхностных слоев сплава [27].

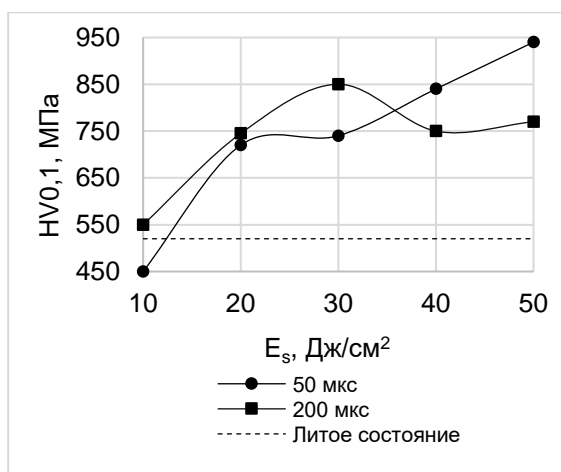


Рисунок 3 – Зависимость  $HV_{0,1}$  поверхности облучения сплава АК5М2 от  $E_s$ .  $HV_{0,1}$  сплава в литом состоянии указана пунктирной линией [26]

Figure 3 - Dependence of  $HV_{0,1}$  of the irradiation surface of the АК5М2 alloy on  $E_s$ .  $HV_{0,1}$  alloy as cast is indicated by the dotted line [26]

Исследования показали, что после обработки в материале формировалась ячеистая структура с частицами второй фазы субмикронного размера, обогащенная атомами Si, Cu, Ni и Fe. В свою очередь, ячеистая структура состояла из двух типов зерен, первые сформированы твердым раствором на основе Al, вторые представляли собой параллельные чередующиеся пластинки, в ко-

торых в большом количестве содержались атомы алюминия и кремния (размеры кристаллитов составляют от 5 до 10 нм). Оценка механических свойств поверхности обработанного материала выявила увеличение значений микротвердости на режимах с плотностями энергии  $E_s = 25, 30, 35$  Дж/см<sup>2</sup>, полученное за счет эмульгирования структуры поверхностного слоя.

## ВЫВОДЫ

За последние 10 лет авторами из РФ выполнялись исследования модифицирующего действия ЭПО на структурно-фазовое состояние поверхностных слоев сталей, существенно различающихся как по своему химическому составу, так и по технологии изготовления. Анализ приведенных выше работ позволяет выделить несколько общих закономерностей, таковыми являются формирование при ЭПО сталей градиентной многофазной структуры, существенное уменьшение размера зерен в поверхностных слоях, а также наличие в зоне термического влияния остаточных напряжений с достаточно высоким уровнем. В остальном каждое отдельное исследование можно считать уникальным. Эффект упрочнения при этом носит индивидуальный характер и, как уже отмечалось в введении, зависит от физико-механических свойств обрабатываемых материалов, а также от параметров электронного луча.

Исследования титановых и алюминиевых сплавов, выполненных после ЭПО, позволяют говорить о существенном изменении структуры поверхностного слоя под действием электронного пучка, благоприятно сказывающегося как на механических [26, 27], так и на усталостных [23, 25] свойствах модифицированных образцов. Благодаря невысокой стоимости ЭПО, ее экологической чистоте и радиационной безопасности, технологию можно рекомендовать для поверхностного упрочнения сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов : учебник / В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин, В.Л. Якушин / Под редакцией Б.А. Калина. М. : Круглый год, 2001. 528 с. : ил. ISBN 5-88671-050-7.
2. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Дж.М. Поут, Г. Фоти, Д.К. Джекобсон. М. : Машиностроение, 1987. 424 с.



## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ. ЧАСТЬ 1

3. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials / Engelko, V. [et al.]. // *Vacuum*. 2001. Vol. 62/2-3. P. 211–216.
4. Устройство для электронно-лучевой резки хрупких листовых неметаллических материалов: Пат. 178158 Рос. Федерация № 2017113054 ; заявл. 14.04.2017; опубл. 14.04.2017, Бюл. № 9. 5 с.
5. Оборудование для аддитивного производства с применением комбинированного процесса селективного электронно-лучевого плавления и электронно-лучевой резки : Пат. 2729279 Рос. Федерация № 2019126338 ; заявл. 17.01.2018; опубл. 05.08.2020, Бюл. № 22. 30 с.
6. Возможность электронно-лучевой установки «ЛУЧ» для размерной микрообработки стекла и керамических материалов / Я. Чжо и [др.]. // *Наноиндустрия*. 2020. Т. 13. № S2. С. 28–35. doi 10.22184/1993-8578.2020.13.2s.122.131.
7. Shcherbakov A.V. Current trends in development of electric equipment for electron-beam precision welding and dimensional machining // *Russian Electrical Engineering*. 2010. Vol. 81. № 3. P. 146–151. doi10.3103/S1068371210030089.
8. Способ изготовления сопла жидкостного ракетного двигателя оживальной формы (варианты) : Пат. 2536653 Рос. Федерация № 2013128090/06 ; заявл. 19.06.2013; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36. 11 с.
9. Способ изготовления секций ротора газотурбинного двигателя : Пат. 2682056 Рос. Федерация № 2018117512 ; заявл. 11.05.2018; опубл. 14.03.2019, Бюл. № 8. 6 с.
10. Gradient boosting method application to support process decisions in the electron-beam welding process / Tynchenko, V.S. [et al.]. // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 21. № 2. P. 206–214. doi 10.31772/2587-6066-2020-21-2-206-214.
11. Features of modeling the electron beam distribution energy for the electron-beam welding process / Kurashkin S.O. [et al.]. // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 21. № 2. P. 266–273. doi 10.31772/2587-6066-2020-21-2-266-273.
12. Смирнов Б., Иванов А. Электронно-лучевое напыление : технология и оборудование // *Наноиндустрия*. 2012. № 6 (36). С. 28–35.
13. Электронно-лучевая наплавка износостойких и коррозионно-стойких покрытий на низкоуглеродистую сталь / Полетика И.М. [и др.]. // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. Т. 321. № 2. С. 86–89.
14. Иванова Е.А., Наркевич Н.А. Исследование структуры и износостойкости азотистых аустенитно-мартенситных покрытий, полученных электронно-лучевой наплавкой в вакууме // *Перспективные материалы*. 2011. № S13. С. 350–357.
15. Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, К.В. Аксёнова, Т.Ю. Кобзарева ; Мин-во обр. и науки РФ, СибГИУ, Межгос. координац. совет по физике прочности и пластичности материалов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2016. 249 с.
16. Влияние внешних энергетических воздействий на структуру и фазовый состав титана при многоциклового усталости / С.В. Коновалов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, И.А. Панченко, С. Чэнь ; М-во науки и высшего обр. РФ, Самарский ун-т, СибГИУ, ИСЭ СО РАН. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2020. 184 с.
17. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V., Kononov S.V. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams. – Cambridge: Cambridge Intern. Sci. Publ. Ltd., 2015. 272 p. ISBN 9781907343537.
18. Структура поверхностного слоя и усталостная долговечность рельсовой стали, облученной высокоинтенсивным электронным пучком / Иванов Ю.Ф. [и др.]. // *Физическая мезомеханика*. – 2013. Т. 16. № 2. С. 47–52.
19. Структура поверхностного слоя, формирующегося в стали 08X18H10T, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком, в условиях многоциклового усталости / Иванов Ю.Ф. и др. // *Физическая мезомеханика*. 2011. Т. 14. № 1. С. 75–82.
20. Коваленко В.В. Структурные и фазовые превращения в инструментальной стали при обработке низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком // *Физика и химия обработки материалов*. 2014. № 5. С. 12–21.
21. Изменение микроструктуры поверхностных слоев стали ЭК-181 при облучении низкоэнергетическими электронными пучками / Панин А.В. и др. // *Перспективные материалы*. 2011. № S13. С. 670–675.
22. Текстурирование в поверхностных слоях мишеней из сплава ВТ6 при облучении сильноточными импульсными электронными пучками / Шулов В.А. и др. // *Физика и химия обработки материалов*. 2016. № 6. С. 19–24.
23. Исследование титанового сплава, подвергнутого электронно-пучковой обработке, приводящей к повышению усталостного ресурса / Коновалов С.В. и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2018. Т. 15. № 1. С. 109–113. doi 10.25712/ASTU.1811-1416.2018.01.014.
24. Шулов В.А., Быценко О.А., Теряев Д.А., Штещенко И.Г., Перлович Ю.А., Исаенкова М.Г., Фесенко В.А. Формирование остаточных напряжений в поверхностных слоях мишеней из сплавов ВТ4 и ВТ20 при одновременном облучении всех сторон сильноточными импульсными электронными пучками / Редколлегия : В.В. Углов и др. // *Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы 13-й Международной конференции*. Минск : Белорусский государственный университет, 2019. С. 331–333.
25. Влияние электронно-пучковой обработки на изменение структуры силумина при многоциклового усталости / Коновалов С.В. и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2015. Т. 12. № 2. С. 193–197.
26. Морфология и микротвердость поверхности сплава АК5М2, облученного электронным пучком / Загуляев Д.В. и др. // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2020. № 4 (54). С. 7–14. doi 10.18323/2073-5073-2020-4-7-14.

27. Effect of the density of electron beam energy on the structure and mechanical characteristics of surface layers of hypoeutectic silumin / Zagulyaev D.V. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences : physics. 2019. Vol. 83. № 10. P. 1402-1409. doi:10.1134/S0367676519100296.

### Информация об авторах

Д. В. Комаров – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева; ведущий инженер Инженерно-технического центра-филиала ООО «Газпром трансгаз Самара».

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Д. В. Жуков – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева; начальник группы Инженерно-технического центра-филиала ООО «Газпром трансгаз Самара».

И. С. Виноградов – начальник Инженерно-технического центра-филиала ООО «Газпром трансгаз Самара».

И. А. Панченко – кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

process of selective electron-beam melting and electron-beam cutting. *Pat. 2729279. Russian Federation, published on 05.08.2020.* Bull. No. 22. (In Russ.).

6. Chzho, Ya., Lyan, M., Moiseev, K.M., Kolechnik, L.L. & Panfilov, Yu.V. (2020). Possibilities of the electron-beam machine "LUCH" for dimensional microprocessing of glass and ceramic materials. *Nanoindustry* [Translated by author of the article], 13(S2), 28-35. (In Russ.).

7. Shcherbakov, A.V. (2010). Current trends in development of electric equipment for electron-beam precision welding and dimensional machining. *Russian Electrical Engineering*, (81-3), 146-151. (In Russ.). doi: 10.3103/S1068371210030089.

8. Rachuk, V.S., Koptev, I.T., Tabakov, K.O., Omigov, B.I., Gordon, A.M., Rubinskij, V.R., Sharov, Yu.V. & Nekrasov, A.N. (2014). Method of fabrication of ogival-shaped nozzle of liquid fuel rocket motor (versions). *Pat. 2536653. Russian Federation, published on 27.12.2014.* Bull. No. 36. (In Russ.).

9. Gejken, V.A., Sharonova, N.I., Potapov, A.Yu., Rodin, E.V., Yakovlev, M.G. & Nikitin, A.I. (2019). Gas turbine engine rotor sections manufacturing method. *Pat. 2682056. Russian Federation, published on 14.03.2019.* Bull. No. 8. (In Russ.).

10. Tynchenko, V.S., Golovenok, I.A., Petrenko, V.E., Milov, A.V. & Murygin, A.V. (2020). Gradient boosting method application to support process decisions in the electron-beam welding process. *Siberian Journal of Science and Technology*, 21(2), 206-214. doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-206-214.

11. Kurashkin, S.O., Seregin, Yu.N., Murygin, A.V. & Petrenko, V.E. (2020). Features of modeling the electron beam distribution energy for the electron-beam welding process. *Siberian Journal of Science and Technology*, 21(2), 266-273. doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-266-273.

12. Smirnov, B. & Ivanov, A. (2012). Electron beam deposition: technology and equipment. *Nanoindustry* [Translated by author of the article], 6(36), 28-35. (In Russ.).

13. Poletika, I.M., Makarov, S.A., Tetyuckaya, M.V. & Krylova, T.A. (2012). Electron Beam Cladding of Wear and Corrosion Resistant Coatings on Low Carbon Steel [Translated by author of the article]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 321(2), 86-89. (In Russ.).

14. Ivanova, E.A. & Narkevich, N.A. (2011). Investigation of the structure and wear resistance of nitrogenous austenitic-martensite coatings obtained by electron beam surfacing in vacuum [Translated by author of the article]. *Promising materials* [Translated by author of the article], (S13), 350-357. (In Russ.).

15. Gromov, V.E., Kononov, S.V., Aksyonova, K.V. & Kobzareva, T.Yu. (2016). *Evolution of the structure and properties of light alloys under energy influences* [Translated by author of the article]. Novosibirsk : Izd-vo SO RAN. (In Russ.).

16. Kononov, S.V., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Panchenko, I.A. & Chen, S. (2020). Influence of external energy influences on the structure and phase composition of titanium during high-cycle fatigue [Translated by author of the article]. Novosibirsk : Izd-vo SO RAN. (In Russ.).

### REFERENCES

1. Gribkov, V.A., Grigor'ev, F.I., Kalin, B.A. & Yakushin, V.L. (2001). *Advanced radiation-beam technologies for material processing* [Translated by author of the article]. Moscow : Kruglyj god. (In Russ.).

2. Pout, Dzh.M., Foti, G. & Dzhekobson, D.K. (1987). *Surface modification and alloying by laser, ion and electron beams.* Moscow : Mashinostroenie. (In Russ.).

3. Engelko, V., Yatsenko, B., Mueller, G. & Bluhm, H. (2001). Pulsed electron beam facility (GE-SA) for surface treatment of materials. *Vacuum*, (62/2-3), 211-216. (In Russ.).

4. Burdavcev, V.A., Zenin, A.A., Klimov, A.S. & Oks, E.M. (2017). Device for electron beam cutting of brittle sheet non-metallic materials [Translated by author of the article]. *Pat. 178158. Russian Federation, published on 26.03.2018.* Bull. No. 9. (In Russ.).

5. Lin', F., Chzhou, B., Ven'tao, Ya., Chzhonsin, L., Lej, Ch., Tin, Ch. & Chao, G. (2020). Equipment for additive production using combined

17. Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Vorobiev, S.V. & Konovalov, S.V. (2015). *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams*. Cambridge: Cambridge Intern. Sci. Publ. Ltd.

18. Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Gri-shunin, V.A., Teresov, A.D. & Konovalov, S.V. (2013). Surface layer structure and fatigue life of rail steel irradiated by a high-intensity electron beam. *Physical Mesomechanics*, 16(2), 47-52. (In Russ.).

19. Ivanov, Yu.F., Gorbunov, S.V., Vorobiev, S.V., Koval, N.N., Konovalov, S.V. & Gromov, V.E. (2011). Structure of the surface layer formed in 08Cr18Ni10Ti steel treated by an electron beam of high energy density in high-cycle fatigue. *Physical Mesomechanics*, 14(1), 75-82. (In Russ.).

20. Kovalenko, V.V. (2014). Structural and phase transformations in the carbon tool steel under treatment with a low-energy high-current electron beam. *Inorganic Materials: Applied Research*, (5), 12-21. (In Russ.).

21. Panin, A.V., Sinyakova, E.A., Perevalova, O.B., Koval', N.N., Leont'eva-Smirnova, M.V. & Chernov, V.M. (2011). Changes in the microstructure of the surface layers of EK-181 steel upon irradiation with low-energy electron beams [Translated by author of the article]. *Promising materials* [Translated by author of the article], (S13), 670-675. (In Russ.).

22. Shulov, V.A., Gromov, A.N., Teryaev, D.A., Perlovich, Yu.A., Isaenkova, M.G. & Fesenko, V.A. (2016). Texture formation in the surface layer of targets from VT6 alloy under irradiation with intense pulsed electron beams. *Inorganic Materials: Applied Research*, (6), 19-24. (In Russ.).

23. Konovalov, S.V., Komissarova, I.A., Chen, X., Kosinov, D.A., Gromov, V.E. & Ivanov, Yu.F. (2018). Research of Ti-alloy subjected to electron beam treatment resulting in fatigue service life increase. *Basic problems of material science*, 15(1), 109-113. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2018.01.014.

24. Shulov, V.A., Bycenko, O.A., Teryaev, D.A., Steshenko, I.G., Perlovich, Yu.A., Isaenkova, M.G. & Fesenko, V.A. Formation of residual stresses in the surface layers of VT4 and VT20 alloy targets during the simultaneous irradiating of part all sizes by intense pulsed electron beams. *Interaction of radiation with solids. Proceedings of the 13th International Conference*. V.V. Uglov (Ed.). Minsk, Belarusian State University. (In Russ.).

25. Konovalov, S.V., Alsaraeva, K.V., Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Petrikova, E.A. & Teresov, A.D. (2015).

Influence of electron-beam treatment on the change in the structure of silumin during high-cycle fatigue [Translated by author of the article]. *Basic problems of material science*, 12(2), 193-197. (In Russ.).

26. Zagulyaev, D.V., Abaturova, A.A., Aksenova, K.V., Leonov, A.A. & Yakupov, D.F. (2020). The morphology and microhardness of the surface of AK5M2 alloy irradiated by an electron beam. *Science Vector of Togliatti State University. Series: Pedagogy, Psychology*, 4(54), 7-14. (In Russ.). doi: 10.18323/2073-5073-2020-4-7-14.

27. Zagulyaev, D.V., Ivanov, Yu.F., Glezer, A.M., Gromov, V.E. & Konovalov, S.V. (2019). Effect of the density of electron beam energy on the structure and mechanical characteristics of surface layers of hypoeutectic silumin. *Bulletin of the russian academy of sciences: physics*, 83(10), 1402-1409. doi: 10.1134/S0367676519100296.

#### Information about the authors

D. V. Komarov - postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University; Leading Engineer Engineering and technical center-branch of Gazprom transgaz Samara LLC.

S. V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University.

D. V. Zhukov - postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University; Leading Head of the Group Engineering and technical center-branch of Gazprom transgaz Samara LLC.

I. S. Vinogradov - Head of the Engineering and technical center-branch of Gazprom transgaz Samara LLC.

I. A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Quality Management and Innovation, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.10.2021; одобрена после рецензирования 24.11.2021; принята к публикации 30.11.2021.

The article was received by the editorial board on 6 Oct 21; approved after reviewing on 24 Nov 21; accepted for publication on 30 Nov 21.