



Обзорная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 53.097:54-116

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028



АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ. ЧАСТЬ 2

Дмитрий Валерьевич Комаров ¹, Сергей Валерьевич Коновалов ^{2, 5},
Дмитрий Владимирович Жуков ³, Илья Сергеевич Виноградов ⁴,
Панченко Ирина Алексеевна ⁵

^{1, 2, 3} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Самара, Россия

^{1, 3, 4} Инженерно-технический центр-филиал ООО «Газпром трансгаз Самара», Самара, Россия

⁵ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

¹ komarov_dimitriy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-2021>

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

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

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

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

Аннотация: Одним из исследуемых направлений повышения технологических и эксплуатационных параметров металлических деталей и изделий является применение концентрированных потоков энергии для упрочнения их поверхности. В настоящее время, благодаря созданию более совершенных электронно-лучевых установок, наиболее перспективным методом целенаправленной модификации структурно-фазового состояния поверхностных слоев металлов и сплавов является электронно-пучковая обработка (ЭПО). Взаимодействие между ускоренными электронами и материалом мишени является сложным процессом, поэтому достоверно выполнить прогноз механических и эксплуатационных свойств, которые будет иметь изделие после модификации, аналитическими методами практически невозможно. Оценка эволюции облучаемого материала возможна только при проведении большого количества натурных исследований.

Настоящая статья является продолжением работы «Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 1» [1], в которой была выполнена оценка использования ЭПО в качестве способа модификации поверхностных слоев сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

Во второй части публикации выполнен анализ исследовательских работ в области применения ЭПО совместно с другими технологиями, а именно после электровзрывного легирования, электродуговой и электроконтактной наплавки, а также для модификации поверхностных слоев аддитивных сплавов. Выполненная оценка показала, что на оптимальные режимы ЭПО позволяют существенно повысить механические характеристики обрабатываемых поверхностей после указанных технологий.

Отмечено, что достоинства метода могли бы быть использованы для компенсации негативных факторов, действующих на одни лопатки турбин газотурбинных двигателей (ГТД). Большая часть указанных изделий, применяемых в отечественных наземных ГТД, выполнены из жаропрочных сплавов на никелевой основе без защитных покрытий. В настоящий момент прикладные исследования по подбору оптимальных режимов ЭПО для данной группы сплавов как в РФ, так и за ее пределами не проводились, поэтому тема является важной для более глубокой проработки.

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

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания: 0809-2021-0013.

Для цитирования: Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 2 / Д. В. Комаров [и др.]. // Ползуновский вестник. 2022. № 3. С. 204 - 215. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028. EDN: <https://elibrary.ru/vajzct>.

ANALYSIS OF THE CURRENT SITUATION IN THE FIELD OF APPLICATION OF ELECTRON-BEAM PROCESSING OF VARIOUS ALLOYS. PART 2

Dmitriy V. Komarov¹, Sergej V. Konovalov^{2,5}, Dmitriy V. Zhukov³,
Ilya S. Vinogradov⁴, Irina A. Panchenko⁵

^{1,2,3} Samara National Research University, Samara, Russia

^{1,3,4} Engineering and technical center-branch of Gazprom transgaz Samara LLC, Samara, Russia

⁵ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

¹ komarov_dimitriy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-2021>

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

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

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

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

Abstract. *One of the areas under study to improve the technological and operational parameters of metal parts and products is the use of concentrated energy flows to harden their surface. At present, thanks to the creation of more advanced electron-beam installations, the most promising method for purposeful modification of the structural-phase state of the surface layers of metals and alloys is electron-beam processing (EBP). The interaction between accelerated electrons and the target material is a complex process; therefore, it is practically impossible to reliably predict the mechanical and operational properties that a product will have after modification by analytical methods. Evaluation of the evolution of the irradiated material is possible only when a large number of field studies are carried out.*

This article is a continuation of the work "Analysis of the current situation in the field of application of electron-beam processing of various alloys. Part 1" [1], which evaluated the use of EBP as a method for modifying the surface layers of steels, aluminum and titanium alloys.

In the second part of the publication, an analysis of research works in the field of EBP application in conjunction with other technologies is carried out, namely, after electroexplosive alloying, electric arc and electrocontact surfacing, as well as for modifying the surface layers of additive alloys. The performed assessment showed that the optimal EBP modes can significantly increase the mechanical characteristics of the treated surfaces after the indicated technologies.

It is noted that the advantages of the method could be used to compensate for the negative factors acting on some turbine blades of gas turbine engines (GTE). Most of these products used in domestic ground-based gas turbine engines are made of heat-resistant nickel-based alloys without protective coatings. At the moment, applied research on the selection of optimal EBP modes for this group of alloys, both in the Russian Federation and abroad, has not been carried out, so the topic is important for deeper study.

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

Acknowledgments: *The research was conducted as part of State Order No. 0809-2021-0013.*

For citation: Komarov, D.V., Konovalov, S.V., Zhukov, D.V., Vinogradov, I.S. & Panchenko, I.A. (2022). Analysis of the current situation in the field of application of electron-beam processing of various alloys. Part 2. *Polzunovskiy vestnik*, Polzunovskiy vestnik, (3), 204-215. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ЭПО ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В последние годы большой научный задел был получен в вопросах обработки по-

POLZUNOVSKIY VESTNIK № 3 2022

верхностных слоев металлических материалов с применением нескольких технологий, одним из которых является ЭПО. Применение сразу нескольких методов обработки позволяет минимизировать недостатки, присутствующие отдельно взятым технологиям. Совместно с ЭПО наиболее распространение полу-

чили сочетание с электровзрывным легированием (ЭВЛ) и технологией наплавки различными способами. Более подробно об этом написано в п.3 и п.4.

Суть ЭВЛ заключается в воздействии импульсных плазменных струй, формируемых при разряде емкостных накопителей энергии через проводники, на поверхности металлов и сплавов. Рабочее вещество ускорителя плазмы одновременно служит как для нагрева модифицируемых поверхностей, так и для их легирования [2]. Проведение ЭВЛ позволяет отказаться от разработки новых дорогостоящих материалов в пользу применения конструкционных и инструментальных сталей с необходимыми свойствами за счет модифицирования поверхностных слоев.

Главным недостатком метода является формирование на поверхности обрабатываемого материала покрытия толщиной от 2 до 15 мкм, содержащего большое количество капельной фракции, микрократеров и микротрещин. Наличие указанных дефектов в деталях и изделиях после ЭВЛ существенно снижает их эксплуатационные характеристики [2]. Поэтому для устранения негативного воздействия от пористости поверхности, получаемой после применения данной технологии, требуется проводить дополнительную обработку. В качестве такого метода хорошо себя зарекомендовало упрочнение поверхности с помощью электронных пучков. Ниже в статье проанализированы результаты исследований комбинирования технологий ЭВЛ и ЭПО для стали 45, титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6, а также для медного сплава М00.

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/см², q_e – плотность мощности, ГВт/м².

1.1. ЭВЛ И ЭПО КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 45

Сталь 45 относится к конструкционным углеродистым нелегированным качественным сталям. Данный сплав является недорогим и широко применяется при изготовлении деталей, которые предполагается эксплуатировать при повышенных нагрузках (шестерни, валы, муфты, инструмент и др.). Изделия из стали 45 мало поддаются износу, могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур.

206

Ряд достоинств, присущих указанному сплаву, способствовал разработке различными авторскими коллективами новых технологий с применением ЭВЛ и ЭПО, позволяющих модифицировать рабочие поверхности деталей, с целью придания им новых эксплуатационных характеристик. В работах [3-6] описаны эволюция структурно-фазового состояния стали, а также изменения некоторых механических и эксплуатационных характеристик, полученных при ЭВЛ медью [3, 5], алюминием и медью [4], бором и медью [6].

Установлено, что в результате ЭВЛ стали 45 медью, формируется многослойная структура, состоящая из покрытия с высоким уровнем дефектов, слоя плавления и слоя термического влияния, переходящего в основной объем образцов [3]. Микротвердость поверхностного слоя после ЭВЛ увеличивается в $\approx 3,5$ раза. Применение ЭПО ($t=50$ мкс, $N=10$, $f=0,3$ c^{-1} , $E_s=15, 20, 25, 30$ Дж/см²) позволяет выглаживать поверхность, а также снизить концентрацию меди в поверхностном слое с увеличением плотности энергии пучка электронов (Рисунок 4) благодаря ее диффузии в основной объем материала. Микротвердость поверхности при этом удается повысить в ≈ 6 раз относительно сердцевины.

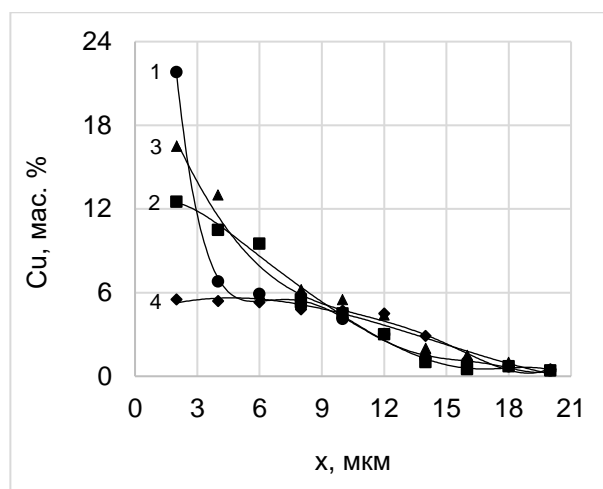


Рисунок 4 – Профиль концентрации меди в поверхностном слое стали, подвергнутой электровзрывному меднению и последующей электронно-пучковой обработке при различной плотности энергии пучка электронов (Дж/см²): 1) 15; 2) 20; 3) 25; 4) 30 (10 имп.; 50 мкс; 0,3 Гц) [3]

Figure 4 – Profile of copper concentration in the surface layer of steel subjected to electro-explosive copper plating and subsequent electron-beam processing at different energy density of the electron beam (J / cm²): 1) 15; 2) 20; 3) 25; 4) 30 (10 pulses; 50 μ s; 0,3 Hz) [3]

ЭВЛ алюминием и медью с последующей ЭПО ($t=50$ мкс, $N=2-200$, $f=0,3$ c^{-1} , $E_s=10-30$ Дж/см²) способствовали уменьшению ше-

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ. ЧАСТЬ 2

роховатости поверхности обрабатываемых образцов [4]. Электровзрывное алитирование совместно с ЭПО позволили увеличить микротвердость в ≈ 4 раза, износостойкость в ≈ 5 раз. Электровзрывное меднение совместно с ЭПО привели к увеличению микротвердости в ≈ 6 раз, износостойкости в ≈ 5 раз.

Электровзрывное боромеднение с последующим ЭПО ($q_e=2,0, 2,5, 3,0$ ГВт/м², $\tau=100$ мкс, $N=10$, $f=0,3$ с⁻¹) способствовало уменьшению шероховатости поверхности, залечиванию поверхностных дефектов, стабилизации фазового состава зоны легирования [6].

В работе [5] как и в [3] также проводилось ЭВЛ медью с последующей ЭПО, параметры электронного луча были схожими за исключением количества импульсов: $\tau=50$ мкс, $N=5, 10, 15, 25, 50$, $f=0,3$ с⁻¹, $E_s=20$ Дж/см².

Удалось установить, что при увеличении количества импульсов воздействия возрастает концентрация меди в поверхностном слое. Так при 5 импульсах содержание меди по весу составляет $\approx 8\%$, при 50 импульсах $\approx 18\%$. При количестве импульсов выше 10 происходит существенное уменьшение твердости поверхности (Рисунок 5). Однако корреляция между указанными характеристиками незначительна.

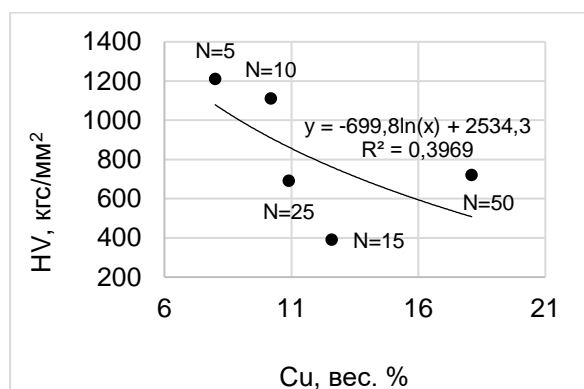


Рисунок 5 – Зависимость твердости поверхностного слоя стали 45, подвергнутой электровзрывному легированию медью и последующей электронно-пучковой обработке, от концентрации меди в стали. Вариация по количеству импульсов облучения при $E_s=20$ Дж/см², 50 мкс, 0,3 Гц (R^2 – величина достоверности аппроксимации)

Figure 5 – Dependence of the hardness of the surface layer of steel 45, subjected to electro-explosive alloying with copper and subsequent electron-beam processing, on the concentration of copper in steel. Variation in the number of irradiation pulses at $E_s = 20$ J / cm², 50 μ s, 0,3 Hz

(R^2 is the approximation reliability value)

1.2. ЭВЛ И ЭПО ТИТАНОГО СПЛАВА ВТ1-0

Титановый сплав ВТ1-0 обладает высокой прочностью, плотностью, легкостью, вязкостью, хорошей коррозионной стойкостью и небольшим коэффициентом теплового расширения. ВТ1-0 широко применяется в приборостроении, производстве компрессоров низкого давления, изготовлении авиационных двигателей, в производстве инструментов. Комплекс уникальных свойств, а также широкая применимость сплава, как и в случае со сталью 45 способствовали глубокому изучению применимости комбинированных технологий, таких как ЭВЛ и ЭПО, для получения новых характеристик материала.

Сформированная система Ti – Y на сплаве ВТ1-0 методом ЭВЛ с последующей ЭПО ($\tau=150$ мкс, $N=3$, $f=0,3$ с⁻¹, $E_s=20-70$ Дж/см²) способствовали значительному повышению прочностных характеристик обрабатываемых образцов [7]. Микротвердость в среднем оказалась в 3 раза больше, чем у подложки, нанотвердость оказалась выше в 10 раз. Модуль упругости благодаря поверхностному сплаву Ti – Y увеличился в 1,2 раза. Благодаря сформированной зеренной структуре наблюдается снижение фактора износа в 1,75 раза (рисунок 6) и коэффициента трения в 1,1 раза.

ЭВЛ сплава диборидом титана с последующей ЭПО ($eU=18$ кэВ, $\tau=100$ мкс ($N=10$), при $\tau=200$ мкс ($N=20$), $E_s=45-60$ Дж/см²) позволили добиться увеличения микротвердости в ≈ 10 раз, износостойкости в ≈ 8 раз. При этом коэффициент трения уменьшился в $\approx 1,2$ раза [8].

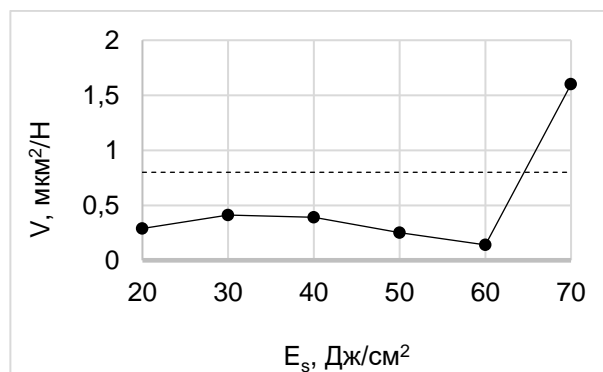


Рисунок 6 – Зависимость фактора износа V поверхностного слоя системы Ti-Y от плотности энергии пучка электронов (штриховая линия соответствует материалу подложки) [7]

Figure 6 - Dependence of the wear factor V of the surface layer of the Ti-Y system on the energy density of the electron beam (the dashed line corresponds to the substrate material) [7]

Электровзрывное науглероживание сплава ВТ1-0 с последующей ЭПО ($E_s=45$ Дж/см², $f=0,3$ с⁻¹, $\tau_1=100$ мкс ($N_1=10$), $\tau_2=100$ мкс ($N_2=20$), $\tau_3=200$ мкс ($N_3=10$), $\tau_4=200$ мкс ($N_4=20$) позволили в оптимальном режиме до 14 раз увеличить микротвердость поверхности облучения [9]. Установлено, что распределение твердости по глубине имеет двузонный характер. В пределах каждой зоны микротвердость меняется лишь на 10-15%, тогда как при переходе от одной зоны к другой в 1,5-2,5 раза. Увеличение числа импульсов при неизменных значениях плотности энергии и длительности импульса приводит к росту толщины выделенных слоев, снижению пористости поверхностного слоя, формированию дендритной структуры в другом слое, эмульгированию промежуточного слоя.

ЭВЛ иттрием с последующим ЭПО на оптимальном режиме ($eU=18$ кэВ, $\tau_1=150$ мкс ($N_1=10$), при $\tau_2=200$ мкс ($N_2=20$), $E_s=50$ Дж/см²) способствовали снижению в 3 раза скорости изнашивания материала и в 7 раз коэффициента трения [10]. При этом модуль Юнга поверхностного слоя относительно подложки увеличился в $\approx 1,2$ раза.

1.3. ЭВЛ И ЭПО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Титановый сплав ВТ6 является одним из самых востребованных в России, а также пользуется спросом за рубежом. К достоинствам сплава можно отнести высокие показатели пластичности, хорошую механическую обрабатываемость, малую плотность, устойчивость к воздействию агрессивных сред, способность работать при больших температурах. ВТ6 применяется в фармацевтической, пищевой, химической промышленности, а также в авиационной промышленности.

Вкратце отметим, что за последние 10 лет различными авторскими коллективами выполнена большая работа по определению влияния ЭВЛ с последующей ЭПО на свойства ВТ6 после модификации. В качестве легирующих добавок для данного сплава применялись карбид бора [11, 12], карбид кремния [13], углеграфитовое волокно [14], оксидом циркония [15].

Во всех проводимых исследованиях установлено, что при подборе оптимального режима ЭПО происходит выглаживание поверхности, перемещение легирующих элементов вдоль обрабатываемой поверхности, улучшение прочностных и трибологических характеристик.

1.4. ЭВЛ И ЭПО МЕДИ М00

Марка М00 относится к сверхчистой меди, используется для изготовления проводни-

ков тока, а также прецизионных сплавов. Интерес к исследованию влияния комбинированных технологий (ЭВЛ + ЭПО) на свойства указанного материала был вызван необходимостью получения износостойкого покрытия на поверхности изготовленных из него изделий, подверженных интенсивным механическим воздействиям при эксплуатации.

В работе [16] ЭВЛ сплава проводилось материалами системы Мо-Си. После чего проводили ЭПО на пяти режимах: 1) $E_s=45$ Дж/см², $\tau=100$ мкс, $N=10$ шт.; 2) $E_s=50$ Дж/см², $\tau=100$ мкс, $N=10$ шт.; 3) $E_s=55$ Дж/см², $\tau=100$ мкс, $N=10$ шт.; 4) $E_s=60$ Дж/см², $\tau=100$ мкс, $N=10$ шт.; 5) $E_s=60$ Дж/см², $\tau=200$ мкс, $N=20$ шт.

Исследования обработанных образцов показали, что ЭПО в режиме плавления поверхностного слоя приводят к его гомогенизации. По всей модифицированной области формируется дисперсно-упрочненная структура. Выявлены режимы, позволяющие формировать прочные поверхностные слои с зеркальным блеском, обладающие субмикронной и нанокристаллической структурой, сформированной из Мо и Си.

ЭВЛ сплава покрытием состава Ag-Ni-N с последующей ЭПО ($E_s=20$ и 40 Дж/см², $\tau=200$ мкс, $N=3$ шт.) и проведением азотирования (923 К, 3 часа) позволили увеличить износостойкость покрытия на 13 % [17]. При этом коэффициент трения уменьшился на 3 %, а твердость поверхности получилась неоднородной, но в среднем превысила твердость подложки на 13 %. Установлено, что основным элементом покрытия является Ag, а фазовый состав существенно зависит от плотности энергии пучка электрона.

ЭВЛ сплава покрытием Cu-Cr с последующим ЭПО ($E_s=55$ Дж/см², $\tau=100$ мкс, $f=0,3$ с⁻¹, $N=10$ шт.) способствовали формированию поверхностного слоя с высокими характеристиками твердости [18].

Таким образом, анализ выполненных исследований применения комбинированного метода обработки, а именно проведение ЭВЛ с последующей обработкой импульсным электронным лучом позволяет в наибольшей степени компенсировать недостатки указанных методов как отдельных технологий для модификации металлов и сплавов. ЭВЛ позволяет доставлять легирующие элементы на большую глубину обрабатываемых изделий, повышая при этом их механические и эксплуатационные характеристики. Применение данного метода дает возможность отказаться от объемного дорогостоящего легирования обрабатываемых деталей и изделий. Присущие ЭВЛ недостатки легко устраняются в хо-

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ. ЧАСТЬ 2

де проведения последующей ЭПО на оптимальных режимах. Анализ данного вопроса позволяет говорить о перспективности применения комбинированной технологии на производстве. Причем показано, что материалом подложки могут служить как стали, так и сплавы на основе титана и меди.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ЭПО ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ ФОРМИРОВАНИЯ НА НИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ИЛИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКИ

Суть наплавки заключается в нанесении металлического слоя на поверхность заготовки путем сварки плавлением. С помощью наплавки решаются задачи по ремонту металлических деталей и изделий путем возобновления их геометрии. Технология может быть также применена для придания конструкции новой формы. Главным преимуществом использования наплавки в отличие от традиционной сварки является придание наплавляемому слою определенных химических и физических свойств, что позволяет повысить эксплуатационные характеристики модифицируемых заготовок [19].

Из существующих способов наплавки в статье будут рассмотрены два, электродуговая и электроконтактная. Электродуговая наплавка отличается простотой и доступностью, позволяет получить наплавленный металл практически любой системы. К недостаткам технологии можно отнести непостоянное качество наплавленного слоя, большое проплавление основного металла. К достоинствам электроконтактной наплавки в отличие от электродуговой можно отнести отсутствие проплавления основного металла, возможность наплавки слоев малой толщины. Недостатком метода является ограниченная номенклатура наплавляемых заготовок [20].

В работах [21-23] исследовалось влияние указанных видов наплавки различных систем с последующей ЭПО на свойства получаемых покрытий. Материалом основы во всех случаях выступила зарубежная мартенситная низкоуглеродистая сталь Hardox 450 (наиболее близкими аналогами среди отечественных марок являются: 18ХГНМФР, 14ХГСАФД, 25ХГСР, 16ХГМФТР), имеющая высокую износостойкость, хорошие свойства холодной гибки и свариваемости.

Исследование свойств наплавленного электроконтактной сваркой слоя системы Fe-C-Cr-Nb-W проводилось после ЭПО на следую-

щих режимах: $E_s=30$ Дж/см², $\tau=200$ мкс, $N=20$ шт., $E_s=30$ Дж/см², $\tau=50$ мкс, $N=1$ шт. [21].

Установлено, что проведение обработки наплавленного слоя электронным пучком приводит к измельчению структуры и изменению морфологии карбидной фазы слоя. Благодаря сформированной структуре износостойкость наплавленного слоя в 70 раз превысила данный параметр у подложки. Коэффициент трения уменьшился в $\approx 1,5$ раза

Исследование [22] свойств наплавленного электродуговым способом системы Fe-C-Ni-V выполнялось после проведения ЭПО в два этапа на таких же режимах, как в работе [21]. Модифицирование электронными пучками наплавленного слоя позволила в 20 раз увеличить фактор износостойкости, уменьшить в 4 раза коэффициент трения.

В работе [23] наплавку системы Fe-C-V-Cr-Nb-W выполняли электроконтактным способом, модифицирование наплавленного слоя также выполняли с помощью ЭПО в два этапа, режимы которой были идентичны исследованиям [21, 22].

Упрочнение электронным пучком наплавленного слоя привело к увеличению износостойкости в 32,5 раза. Повышение трибологических свойств стало возможным благодаря сформированному в нем после высокоскоростной закалки поверхностного слоя толщиной до 50 мкм многофазной структуры. Выполненные исследования показали, что ее состав представлен карбидами легирующих элементов и мартенсита пакетной морфологии, поперечные размеры кристаллов которого в 3-4 раза меньше поперечных размеров кристаллов той же стали при печной закалке.

Таким образом, исследования [21-23] показали, что ЭПО может успешно применяться в качестве дополнительного метода упрочнения наплавленных слоев для улучшения их трибологических характеристик. Необходимо отметить, что в отличие от ЭВЛ и последующего ЭПО, модифицирование наплавленных слоев в рассматриваемых работах проходило в два этапа. Подбор режимов облучения был осуществлен по результатам расчета температурного поля, формирующегося в поверхностном слое при одноимпульсном облучении материала [24, 25].

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭПО ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ АДДИТИВНЫХ СПЛАВОВ

В последние годы все больший интерес в области физического материаловедения вызывают высокоэнтропийные сплавы из-за

возможности формирования уникальных свойств при их создании [26, 27]. Одним из способов получения указанных сплавов является применение аддитивных технологий (АТ). Применяемые сегодня АТ можно разделить по типу источника энергии, который используется для расплавления исходного материала: лазерная энергия, энергия пучка электронов, энергия электрической дуги и энергия плазмы.

Анализ работы [28] показал, что самым молодым на сегодняшний день направлением является проволоочно-дуговое аддитивное производство. Данный метод имеет высокую скорость осаждения и высокую степень использования материала, обладает возможностью создания деталей больших размеров.

Развитие новой технологии сопровождается не только исследованиями, направленными на определение оптимальных режимов для различных систем, но и поиском дополнительных технологий, которые позволили бы улучшить поверхностные свойства сплавов. Одним из перспективных методов модификации сплавов аддитивного производства является ЭПО. Данный вывод нашел подтверждение своей применимости в работах [29-31].

Так, исследования [29] показали, что ЭПО ($E_s=10, 15, 20, 25, 30$ Дж/см², $t=200$ мкс, $N=3$ шт.) высокоэнтропийного сплава системы AlCoCrFeNi, полученного с помощью проволоочно-дуговой аддитивной технологии, приводит к увеличению прочности и пластичности облученного материала. Предел прочности на сжатие увеличился в 1,1-1,6 раз, наибольшее значение при этом составило 2179 МПа. Условный предел текучести на сжатие при этом составил 522 МПа, модуль Юнга 257 МПа.

В работе [30] выполнено исследование структуры и свойств образцов Al-Mg-сплава, изготовленного аддитивным методом дуговой сварки с последующим проведением ЭПО ($E_s=15$ Дж/см², $t=200$ мкс, $N=3$ шт.). Установлено, что облучение электронным пучком приводит к плавлению и высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя толщиной до 45 мкм. Образцы, обработанные пучком, показали высокую повторяемость прочностных и пластических свойств при проведении испытаний на растяжение по сравнению с необработанными образцами.

Дальнейшие исследования сплава, описанного в статье [30], показали, что при плотности энергии в 10 Дж/см² наблюдается выравнивание размера зерен модифицированного слоя, для режима характерно минимальное значение глубины микротрещин, при

этом изменения в фазовом составе материала не происходило [31].

Таким образом, пионерские работы [28-31] доказали, что применение проволоочно-дуговой аддитивной технологии и последующей ЭПО позволяет благоприятно модифицировать структуру верхнего слоя наплавленного материала на оптимальных режимах электронного пучка. Дальнейшее исследование комбинированного применения указанных технологий является перспективным направлением в материаловедение.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ЭПО ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Вопрос о применении ЭПО для модификации поверхностных слоев изделий, выполненных из жаропрочных сплавов на никелевой основе не просто так вынесен в отдельный пункт. Обусловлено это тем, что из указанных материалов изготавливаются одни из наиболее нагруженных и ответственных ГТД, а именно лопатки турбин высокого и низкого давления (ТВД, ТНД).

В процессе работы лопатки испытывают значительные осевые, радиальные и вибрационные нагрузки. Изделия работают продолжительное время при повышенных температурах в продуктах сгорания топлива, что приводит к деградации их материала. Изменение физико-химических свойств металла лопаток, в первую очередь уменьшение его характеристик пластичности, создает благоприятные условия к накоплению усталостных повреждений в приповерхностном слое материала изделий, приводящих к возникновению усталостных трещин, их развитию и окончательному разрушению. В свою очередь обрыв даже небольшой части пера лопатки может привести к лавинообразному разрушению всей ступени, а затем и полностью проточной части двигателя. Именно поэтому продление ресурса таких дорогостоящих изделий как лопатки является актуальной задачей, которая может быть реализована за счет предварительного упрочнения поверхностных слоев электронными пучками.

В работах [32-35] проводилось исследование влияния сильноточных импульсных электронных пучков (СИЭП) на состояние поверхностных слоев лопаток ГТД, выполненных из никелевых сплавов ЖС-36, ЖС26НК и ЖС32ВИ. Во всех случаях предварительно на поверхность образцов наносилось защитное покрытие системы Ni-Cr-Al-Y. Результаты исследований доказали, что СИЭП является эффективным инструментом для модифицирования поверхности как

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ. ЧАСТЬ 2

обычных лопаток, так и с перфорированными отверстиями. В отдельных случаях удалось показать, что комбинированная технология позволяет повысить усталостную прочность лопаток на 10-30 %, жаростойкость в 2-3 раза, сопротивление солевой коррозии – до 6 раз.

Кроме того, применение электронных пучков низкой мощности позволяет выполнять полировку поверхности обрабатываемых изделий. Данный факт имеет весомое значение при выборе технологии для поверхностной обработки лопаток, т.к. шероховатость их поверхности существенно влияет на коэффициент полезного действия ТВД [36] и всей установки в целом.

Применение концентрированных импульсных потоков энергии сегодня для изготовления и ремонта лопаток ГТД, изготовленных из жаропрочных никелевых сплавов без применения защитных покрытий, является малоизученным направлением. Однако прикладные исследования в этой области смогли бы дать ответ на вопрос о применимости электронного луча для модификации поверхности деталей горячего тракта. Подбор оптимальных режимов обработки позволил бы внедрить технологию в массовое производство, увеличив при этом ресурс работы и безопасность эксплуатации ГТД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современной ситуации в области применения ЭПО с целью повышения механических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов позволяет сделать принципиальный вывод о применимости технологии к широкому кругу металлических материалов, в частности к: нержавеющей, инструментальным и жаропрочным сталям, сплавам на основе титана, алюминия, меди и никеля.

Результаты исследований различных авторских коллективов показали, что обработка электронным пучком на оптимальных режимах позволяет существенно повысить такие характеристики поверхностного слоя изделий как износостойкость, микротвердость, нанотвердость, модуль Юнга, уменьшить коэффициент трения. Благодаря поверхностному упрочнению, в конечном итоге, удается существенно повысить такие важные эксплуатационные характеристики как коррозионная стойкость и усталостная долговечность изделий.

ЭПО является также хорошим инструментом для дополнительной обработки поверхностей после электровзрывного легирования и наплавки различных систем. Воздействие электронных пучков позволяет гомоген-

низировать поверхностные слои обрабатываемых изделий, при этом в большинстве случаев фиксируется существенное увеличение их прочностных свойств, а также улучшение трибологических характеристик.

Однако в настоящее время отсутствует серьезный научный задел в обработке электронными пучками жаропрочных сплавов на никелевой основе без защитных покрытий. Ожидается, что статья сыграет важную роль в исследованиях модифицирующих свойств ЭПО на указанные сплавы, результатом которых станет понимание и описание физической модели процессов взаимодействия пучка с указанными материалами. Проведение прикладных исследований по подбору оптимальных режимов облучения поможет массово применять технологию при производстве изделий из никелевых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.2072-8921.2021.00.000.
2. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А. Я. Багаутдинов [и др.]. Новокузнецк : изд-во СибГИУ, 2007. 301 с..
3. Легирование поверхности углеродистой стали медью путем электрического взрыва проводника и последующей электронно-пучковой обработки / Иванов Ю.Ф. [и др.]. // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318, № 2. С. 101-105.
4. Разработка комбинированного метода модификации поверхности стали 45 / Филимонов С.Ю. [и др.]. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 2011. № 5 (100), С. 195-200.
5. Структура и микротвердость углеродистой стали 45 после электровзрывного меднения и последующей электронно-пучковой обработки / Громов В.Е. [и др.]. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 2 (46), С. 51-62.
6. Особенности влияния электронно-пучковой обработки на поверхность стали 45 после электровзрывного боромеднения / Ващук Е.С. [и др.]. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. № 3 (52), С. 69-72.
7. Соснин К.В., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф. Особенности физико-механических свойств поверхностного сплава системы Ti - Y, сформированного методами электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 1 (11). С. 11-12.
8. Структурно-фазовые состояния наноструктурированных поверхностных слоев титана VT1-0 после комбинированной электронно-ионно-

плазменной обработки / Иванов Ю.Ф. [и др.]. // Решетневские чтения. 2014. Т. 1, С. 291-293.

9. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру и микротвердость поверхности технически чистого титана BT1-0 после электровзрывного науглероживания / Бащенко Л.П. [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9. № 1, С. 15-22.

10. Свойства поверхностных слоев титана после электровзрывного легирования иттрием и электронно-пучковой обработки / Романов Д.А. [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13. № 3, С. 283-291.

11. Поверхностное упрочнение сплава BT6 электровзрывным легированием с карбидом бора и электронно-пучковой обработкой / Кобзарева Т.Ю. [и др.]. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 4 (69), С. 102-112. doi 10.17212/1994-6309-2015-4-102-112.

12. Будовских Е.А., Бащенко Л.П., Райков С.В. Электровзрывное легирование поверхности сплава BT6 порошком карбида бора с последующей электронно-пучковой обработкой // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16 № 4, С. 474-481. doi 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.04.007.

13. Модификация поверхности сплава BT6 плазмой электрического взрыва проводящего материала и облучением электронным пучком / Иванов Ю.Ф. [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2013. № 6, С. 45-49.

14. Анализ растворения углерода в титане при электронно-пучковой обработке / Громов В.Е. [и др.]. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2013. Т. 5. № 1, С. 82-87.

15. Структура зоны упрочнения титанового сплава BT6 при электровзрывном науглероживании совместно с оксидом циркония и последующей электронно-пучковой обработке / Кобзарева Т.Ю. [и др.]. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 4-2, С. 1717-1718.

16. Структура композиционных покрытий из несмешивающихся компонентов системы Cu-Mo, полученных электровзрывным напылением и последующей электронно-пучковой обработкой / Романов Д.А. [и др.]. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2013. № 5, С. 267-273.

17. Структура и свойства покрытия на основе серебра, никеля и азота, сформированного комбинированным методом на меди / Иванов Ю.Ф. [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 1, С. 68-73. doi 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.01.010.

18. Структурно-фазовое состояние электроэрозионного покрытия Cu-Cr, сформированного на меди комбинированным методом / Романов Д.А. [и др.]. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 7 (139), С. 25-29.

19. Черноиванов В. И., Голубев И. Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). Москва: ФГНУ «Росинформротех». 2010. 376 с.

20. Щербаков, Ю. В., Кашфуллин А. М. Современные способы восстановления и упрочнения деталей / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова». Пермь : ИПЦ Прокрость, 2018. 191 с.

21. Структура и трибологические свойства поверхностного слоя, наплавленного на мартенситную сталь и модифицированного электронно-пучковой обработкой / Громов В.Е. [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14. № 1, С. 28-33.

22. Повышение свойств низкоуглеродистой стали наплавкой порошковой борсодержащей проволокой / Рубаникова Ю.А. [и др.]. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2018. № 4(26), С. 3-7.

23. Электронно-пучковая модификация упрочненного слоя, сформированного на стали Hardox 450 электроконтактной наплавкой проволоки системы Fe-C-V-Cr-Nb-W / Коновалов С.В. [и др.]. // Письма о материалах. 2016. Т. 6. № 4 (24), С. 350-354. doi 10.22226/2410-3535-2016-4-350-354.

24. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Модифицирование структуры и свойств легких сплавов упрочняющими технологиями. Новокузнецк : Полиграфист, 2015. 226 с.

25. Гришунин В.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Денисова Ю.А. Электронно-пучковая модификация структуры и свойств стали. / Новокузнецк: Полиграфист, 2012. 308 с.

26. Высокоэнтропийные сплавы. / Громов В.Е. [и др.]. Новокузнецк : Полиграфист, 2021. 178 с.

27. George E.P., Curtin W.A., Tagan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // Act. Mater. 2020. Vol. 188, P. 435–474.

28. Структурно-фазовое состояние высокоэнтропийного сплава Al-Co-Cr-Fe-Ni, полученного проволочно-дуговой аддитивной технологией / Осинцев К.А. [др.]. // Ползуновский вестник, 2021. № 1, С. 141-146. doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.020.

29. Исследование структуры и свойств высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNi после электронно-пучковой обработки / Иванов Ю.Ф. [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 2, С. 154-164. – doi 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.02.002.

30. Модификация импульсным электронным пучком поверхности образцов Al-Mg-сплава, полученного методами аддитивных технологий: структура и свойства / Гэн Я. [и др.]. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 5, С. 42-46. doi 10.31857/S1028096021050083.

31. Effect of electron beam energy densities on the surface morphology and tensile property of additively manufactured Al-Mg alloy / Geng Y. [et al.]. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2021. Vol. 498, P. 15-22.

32. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для восстановления эксплуа-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2022

тационных свойств лопаток газотурбинных двигателей / Шулов В.А. [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 1, С. 43-49.

33. Влияние облучения сильноточными импульсными электронными пучками на поверхностные слои современных жаропрочных никелевых сплавов с ионно-плазменными покрытиями различного состава / Быценко О.А. [и др.]. // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (42), С. 10. doi 10.18577/2307-6046-2016-0-6-10-10.

34. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинного двигателя с перфорационными отверстиями / Шулов В.А. [и др.]. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 10(106), С. 23-25.

35. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинных двигателей (обзор) / В. А. Шулов [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 1, С. 38-48. doi 10.17073/1997-308X-2015-1-38-48.

36. Оценка влияния шероховатости поверхности лопаток на параметры турбины высокого давления / Хайрулин В.Т. [и др.]. // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2014. №37, С. 99-111.

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, главный научный сотрудник лаборатории ОНИЛ-4 Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

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.

REFERENCES

1. Komarov, D.V., Kononov, 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.

2. Bagautdinov, A.Ya., Budovskih, E.A., Ivanov, Yu.F. & Gromov, V.E. (2007). *Physical foundations of electroexplosive alloying of metals and alloys* [Translated by author of the article]. Novokuzneck: Izd-vo SibGIU. (In Russ.).

3. Ivanov, Yu.F., Filimonov, S.Yu., Teresov, A.D., Kolubaeva, Yu.A., Budovskih, E.A. & Gromov, V.E. (2011). Alloying the surface of carbon steel with copper by electrical explosion of the conductor and subsequent electron-beam processing [Translated by author of the article], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 318(2), 101-105. (In Russ.).

4. Filimonov, S.Yu., Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E. & Budovskih, E.A. (2011). Development of a combined method for modification of the surface of steel 45 [Translated by author of the article], *Scientific bulletin of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics* [Translated by author of the article], 5(100), 195-200. (In Russ.).

5. Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Romanov, D.A., Budovskikh, E.A., Vashchuk, E.S., Denisova, Yu.A., Kononov, S.V., Teresov, A.D. & Filimonov, S.Yu. (2014). Peculiarities of electroexplosive copper plating of steel 45 and subsequent electron-beam processing. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2(46), 51-62. (In Russ.).

6. Vashchuk, E.S., Budovskih, E.A., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Teplyh, A.M. & Droblyaz, E.A. (2011). The influence of electron beam treatment on a surface of steel 45 after electroexplosive borocoppering. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*, 3(52), 69-72. (In Russ.).

7. Sosnin, K.V., Budovskih, E.A. & Ivanov, Yu.F. (2015). Peculiarities of physical-mechanical properties of the surface alloy of Ti-Y system formed by the methods of electro-explosive alloying and electron-beam treatment. *Bulletin of the Siberian State Industrial University* [Translated by author of the article], 1(11), 11-12. (In Russ.).

8. Ivanov, Yu.F., Teresov, A.D., Gromov, V.E., Budovskih, E.A. & Klopotov, A.A. (2014). Structural-phase state of the surface layers of nanostructured titanium VT1-0 after combined electron-ion-plasma treatment. *Reshetnev reading*, (1), 291-293. (In Russ.).

9. Bashchenko, L.P., Soskova, N.A., Ivanov, Yu.F., Teresov, A.D., Rajkov, S.V., Budovskih, E.A. & Gromov, V.E. (2012). Influence of electron-beam processing on the structure and microhardness of the surface of commercially pure VT1-0 titanium after electroexplosive carburization. *Basic problems of material science*, 9(1), 15-22. (In Russ.).

10. Romanov, D.A., Sosnin, K.V., Gromov, V.E. & Ivanov, Yu.F. (2016). Properties of surface layers of titanium after electroexplosive alloying with yttrium and electron-beam processing [Translated by author of the article]. *Basic problems of material science*, 13(3), 283-291. (In Russ.).

11. Kobzareva, T.Yu., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Konovalov, S.V., Budovskikh, E.A. & Bataev, V.A. (2015). Surface hardening alloy VT6 of electro-explosion alloying with boron carbide and by electron beam treatment. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*, 4(69), 102-112. (In Russ.). doi 10.17212/1994-6309-2015-4-102-112.
12. Budovskikh, E.A., Bashchenko, L.P. & Rajkov, S.V. (2019). Electroexplosive alloying of the surface of the alloy VT6 by powder of boron carbide with subsequent electron-beam treatment. *Basic problems of material science*, 16(4), 474-481. (In Russ.). doi 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.04.007.
13. Ivanov, Yu.F., Kobzareva, T.Yu., Rajkov, S.V., Gromov, V.E., Soskova, N.A. & Budovskikh, E.A. (2013). Modification of the surface of VT6 alloy by the plasma of an electric explosion of a conductive material and irradiation with an electron beam [Translated by author of the article]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, (6), 45-49. (In Russ.).
14. Gromov, V.E., Rajkov, S.V., Sherstobitov, D.A., Ivanov, Yu.F., Haimzon, B.B. & Konovalov, S.V. (2013). Analysis of carbon dissolution in titanium under electron beam treatment. *Bulletin of the South Ural State University», series «Mathematics. Mechanics. Physics*, 5(1), 82-87. (In Russ.).
15. Kobzareva, T.Yu., Rajkov, S.V., Soskova, N.A., Vashchuk, E.S., Budovskikh, E.A., Gromov, V.E. & Ivanov, Yu.F. (2013). Structure of hardening zone of titanium alloy VT6 by electro-explosive carburizing with oxide zirconium and subsequent electron-beam treatment. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 18(4-2), 1717-1718. (In Russ.).
16. Romanov, D.A., Olesyuk, O.V., Budovskikh, E.A., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F. & Teresov, A.D. (2013). Structure of composite coatings immiscible component of, received electroexplosive spraying and a modified high intensity electron beam. *Physico-chemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials* [Translated by author of the article], (5), 267-273. (In Russ.).
17. Ivanov, Yu.F., Pochetuha, V.V., Romanov, D.A. & Gromov, V.E. (2021). Structure and properties of coating based on silver, nickel and nitrogen formed by the combined method on copper. *Basic problems of material science*, 18(1), 68-73. (In Russ.). doi 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.01.010.
18. Romanov, D.A., Goncharova, E.N., Budovskikh, E.A., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F. & Teresov, A.D. (2016). Research of structure and tribological properties of Cu-Cr electroerosive coating, formed on copper by the combined method. *Hardening technologies and coatings* [Translated by author of the article], 7(139), 25-29. (In Russ.).
19. Chernoiyanov, V. I. & Golubev, I. G. (2010). *Restoration of machine parts (State and prospects)*. Moscow: FGNU «Rosinformagrotekh». (In Russ.).
20. Shcherbakov, Yu. V. & Kashfullin, A. M. (2018). *Modern methods of restoring and hardening parts*. Permian: IPC Prokrost'. (In Russ.).
21. Gromov, V.E., Kormyshev, V.E., Konovalov, S.V., Ivanov, Yu.F., Teresov, A.D. & Bataev, V.A. (2017). Structure and tribological properties of the surface layer deposited on martensitic steel and modified by electron-beam processing [Translated by author of the article]. *Basic problems of material science*, 14(1), 28-33. (In Russ.).
22. Rubannikova, Yu.A., Kormyshev, V.E., Gromov, V.E., Kosinov, D.A. & Romanov, D.A. (2018). Increasing properties of low-carbon steel by means of boron cord wire depositing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University* [Translated by author of the article], 4(26), 3-7. (In Russ.).
23. Konovalov, S.V., Kormyshev, V.E., Ivanov, Yu.F. & Teresov, A.D. (2016). Electron-beam processing of the hardened layer formed on Hardox 450 steel electric-wire welding system Fe-C-V-Cr-Nb-W. *Letters on Materials*, 6(4 (24)), 350-354. (In Russ.). doi 10.22226/2410-3535-2016-4-350-354.
24. Gromov, V.E. & Ivanov, Yu.F. (2015). *Modification of the structure and properties of light alloys by strengthening technologies* [Translated by author of the article]. Novokuznetsk: Poligrafist. (In Russ.).
25. Grishunin, V.A., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F. & Denisova, Yu.A. (2012). *Electron-beam modification of the structure and properties of steel* [Translated by author of the article]. Novokuznetsk: Poligrafist. (In Russ.).
26. Gromov, V.E., Konovalov, S.V., Ivanov, Yu.F., Osincev, K.A., Rubannikova, Yu.A., Peregudov, O.A. & Semin, A.P. (2021). *High entropy alloys* [Translated by author of the article]. Novokuznetsk: Poligrafist. (In Russ.).
27. George, E.P., Curtin, W.A. & Tagan, C.C. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Act. Mater.*, (188), 435-474.
28. Osincev, K.A., Gromov, V.E., Konovalov, S.V., Panchenko, I.A. & Vashchuk, E.S. (2021). Structural-phase state of high-entropy Al-Co-Cr-Fe-Ni alloy obtained by wire-arc additive technology. *Polzunovskij vestnik*, 2021, (1), 141-146. (In Russ.). doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.020.
29. Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Konovalov, S.V., Rubannikova, Yu.A., Osincev, K.A. & Chen', S. Research of the structure and properties of AlCo-CrFeNi high entropy alloy subjected to electron beam processing. *Basic problems of material science*, 18(2), 154-164. (In Russ.). doi 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.02.002.
30. Gen, Ya., Panchenko, I.A., Chen', S., Konovalov, S.V. & Ivanov, Yu.F. (2021). Modification by a pulse electron beam of the surface of Al-Mg alloy samples obtained by the methods of additive technologies: structure and properties. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, (5), 42-46. (In Russ.). doi 10.31857/S1028096021050083.
31. Geng, Y., Konovalov, S., Chen, X., Panchenko, I. & Ivanov, Y. (2021). Effect of electron beam energy densities on the surface morphology and tensile property of additively manufactured Al-Mg alloy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, (498), 15-22.
32. Shulov, V.A., Engel'ko, V.I., Gromov, A.N., Teryaev, D.A., Bycenko, O.A. & Shirvan'yanc, G.G. (2014). Application of high-current pulsed electron beams to restore the operational properties of gas turbine engine blades [Translated by author of the article]. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya*, (1), 43-49. (In Russ.).

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ. ЧАСТЬ 2

33. Bycenko, O.A., Filonova, E.V., Markov, A.B. & Belova, N.A. (2016). Influence of radiation by high-current pulse electronbeams on surface layers of modern heat-resisting nickel alloys with ion-plasma coatings of different composition. *Proceedings of VIAM*, 6(42), 10. (In Russ.). doi 10.18577/2307-6046-2016-0-6-10-10.

34. Shulov, V.A., Engel'ko, V.I., Gromov, A.N., Teryaev, D.A. & Bycenko, O.A. (2013). Application of intense pulsed electronbeams for repair and property recovery of turbine blades with perforate holes. *Hardening technologies and coatings* [Translated by author of the article, 10(106), 23-25. (In Russ.).

35. Shulov, V. A., Gromov, A. N., Teryaev, D. A. & Engel'ko, V. I. (2015). Application of high-current pulsed electron beams to modify the surface of gas turbine engine blades (review) [Translated by author of the article]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, (1), 38-48. (In Russ.). doi 10.17073/1997-308X-2015-1-38-48.

36. Hajrulin, V.T., Samohvalov, N.Yu., Tihonov, A.S. & Sendyurev, S.I. (2014). Evaluation of blade roughness influence on high pressure turbine efficiency. *Bulletin of the Perm National Polytechnic University. Aerospace engineering* [Translated by author of the article], (37), 99-111. (In Russ.).

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 14.06.2022; одобрена после рецензирования 25.07.2022; принята к публикации 15.08.2022.

The article was received by the editorial board on 14 June 2022 approved after editing on 25 July 2022; accepted for publication on 15 Aug 2022.

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. Kononov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the ONIL-4 Laboratory of the Samara National Research University, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial 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.