

**Оригинальная статья**

УДК 621:538.911:538.951

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-47-57

**ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ  
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И  
МЕДИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПРОВОЛОЧНОЙ АДДИТИВНОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ**

© 2024 г. А. В. Чумаевский, К. С. Осипович, В. М. Семенчук, С. Ю. Тарасов,  
Е. А. Колубаев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 2/4)

**Аннотация.** Проведены исследования закономерностей организации структуры и свойств крупногабаритных деталей на основе меди и нержавеющей стали в процессе печати методом проволоочной аддитивной электронно-лучевой технологии. Была отработана на плоских тестовых образцах методика 3D-печати, которая обеспечивала получение бездефектных экспериментальных образцов с невысокой степенью взаимного перемешивания компонентов в переходной зоне. Печать проводили на экспериментальном оборудовании в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН последовательным формированием на подложке из нержавеющей стали с использованием наклонно-поворотного охлаждаемого стола стального цилиндра. Далее с предварительным прогревом стали на нее наносили медь на всю высоту цилиндра. Между нанесением филаментов на основе стали и меди механической обработки стального цилиндра не проводили. По данным структурных исследований в образцах происходит формирование достаточно плотного контакта меди и стали, что свидетельствует о полном заполнении медью всех неровностей, находившихся на стальном цилиндре после печати. В стальных участках биметаллических элементов сохраняется дендритное строение, в медных – структура является зеренной. Ориентация зерен или дендритов в компонентах образца связана с локальными особенностями процесса печати и направлением отвода тепла. Это связанные с геометрией зоны печати при формировании биметаллических образцов, приводящие к качественным различиям в структуре, изменяющейся от мелкозернистой равноосной до крупнозернистой столбчатой. Механические свойства медного и стального фрагментов в исследованных образцах находится на достаточно высоком уровне, прочностные показатели градиентной зоны имеют промежуточные значения.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая аддитивная технология, подача двух проволок в ванну расплава, функционально-градиентный материал, механические свойства, биметаллические изделия

**Благодарности.** Исследования проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИФПМ СО РАН «НАНОТЕХ».

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-19-00578, <https://rscf.ru/project/22-19-00578/>.

**Для цитирования:** Чумаевский А.В., Осипович К.С., Семенчук В.М., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А. Особенности получения и организации структуры крупногабаритных функционально-градиентных биметаллических элементов на основе нержавеющей стали и меди методом электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):47–57. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(47\)-47-57](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(47)-47-57)

*Original article*

**PECULIARITIES OF OBTAINING AND ORGANISING THE STRUCTURE OF LARGE-SIZE FUNCTIONAL-GRADIENT BIMETALLIC ELEMENTS BASED ON STAINLESS STEEL AND COPPER BY WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING**

© 2024 A. V. Chumaevskii, K. S. Osipovich, V. M. Senemchuk, S. Yu. Tarasov, E. A. Kolubaev

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

**Abstract.** Studies of the patterns of organization of the structure and properties of large-sized parts based on copper and stainless steel in the printing process by wire additive electron beam technology have been carried out. A 3D printing technique was developed on flat test samples, which ensured the production of defect-free experimental samples with a low degree of mutual mixing of components in the transition zone. Printing was carried out on experimental equipment at the Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS by sequential formation on a stainless steel substrate using an inclined-rotary cooled table of a steel cylinder. Then, with preheating of the steel, copper was applied to it to the entire height of the cylinder. No mechanical treatment of the steel cylinder was carried out between the application of filaments based on steel and copper. According to structural studies, a sufficiently dense contact of copper and steel is formed in the samples, which indicates that all irregularities on the steel cylinder after printing are completely filled with copper. In steel sections of bimetallic elements, the dendritic structure is preserved, in copper sections the structure is granular. The orientation of grains or dendrites in the sample components is related to the local features of the printing process and the direction of heat dissipation. These are related to the geometry of the printing zone during the formation of bimetallic samples, leading to qualitative differences in the structure, varying from fine-grained equiaxed to coarse-grained columnar. The mechanical properties of the copper and steel fragments in the studied samples are at a fairly high level, the strength parameters of the gradient zone have intermediate values.

**Keywords:** electron beam additive manufacturing, dual wire-feed technology, functional graded material, mechanical properties, bimetallic components

**Acknowledgements.** The studies were carried out using the equipment of the NANOTECH Shared-use Center of ISPMS SB RAS.

**Funding.** The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00578, <https://rscf.ru/project/22-19-00578/>.

**For citation:** Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Semenchuk V.M., Tarasov S.Y., Kolubaev E.A. Peculiarities of obtaining and organising the structure of large-size functional-gradient bimetallic elements based on stainless steel and copper by wire-feed electron beam additive manufacturing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):47–57. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(47\)-47-57](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(47)-47-57)

**Введение**

Современные технологии аддитивного производства применяются для получения изделий из различных металлов и сплавов [1]. Их применение позволяет изготавливать детали в широком диапазоне форм и размеров [2]. Использование различных способов аддитивного производства позволяет получать детали с неоднородной, сложной и градиентной структурой с изначально заданным распределением компонентов в объеме изделия [3; 4]. При использова-

нии современных технологий высокопроизводительного аддитивного электронно-лучевого производства [5] возможно не только управление геометрией получаемых изделий, но и формирование в отдельных их частях необходимых эксплуатационных характеристик. Так как применение электронно-пучковых технологий для обработки изделий из различных металлов и сплавов достаточно хорошо изучено [6], рассматриваемый метод позволяет формировать детали с прогнозируемыми свойствами. Приме-

нение различных способов управления структурой при печати позволяет формировать в изделиях как композитную структуру, так и упрочненные или модифицированные сплавы [7; 8]. Получение функционально-градиентных материалов и деталей [9; 10] различными по физической природе аддитивными методами в последние годы набирает интенсивность в мировой литературе. Возможность соединения в одном изделии свойств двух принципиально различающихся по своим характеристикам материалов [11] дает неоспоримые преимущества в сравнении с традиционными технологиями. По этой причине все большее количество работ появляется по созданию функционально-градиентных материалов и изделий методами аддитивных технологий [12].

В основе высокопроизводительных проволочных технологий получения изделий с функционально-градиентной структурой лежит принцип поочередной или одновременной подачи в ванну расплава двух или более филаментов различных металлов или сплавов [13; 14]. Соответственно в процессе печати возможно формирование как плавного, так и резкого перехода между компонентами изделия [15; 16]. Такое положение позволяет использовать проволочную аддитивную электронно-лучевую и электродуговую технологии на производстве для широкого спектра возможных изделий.

В настоящее время одними из наиболее интересных в промышленном применении биметаллических изделий являются емкости и резервуары с внутренним объемом из нержавеющей стали и медной поверхностью. Это необходимо, например, для отвода тепла от емкостей и аппаратов химической промышленности или для оборудования криогенной техники. Нержавеющая сталь может обеспечивать высокие механические свойства и коррозионную стойкость при повышенных и пониженных температурах, а медь – интенсивность теплопередачи от изделия. Одной из наиболее подходящих технологий для изготовления изделий такого типа при этом является проволочная электронно-лучевая 3D-печать [17]. При ее использовании возможно формирование деталей с функционально-градиентной структурой за один технологический цикл, что обеспечивает дополнительную экономию как ресурсов, так и временных затрат при производстве [18]. В настоящее время практически отсутствует информация о получении крупногабаритных изделий на основе меди и стали рассматриваемым методом [19; 20]. По этой причине настоящая работа направлена на получение биметаллического цилиндра на основе меди и стали с использованием проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии.

## Материалы и методы исследования

В настоящей работе были получены изначально плоские, а затем цилиндрические образцы по схеме, представленной на рис. 1. Предварительный образец 1 получали поэтапным нанесением на подложку двух вертикальных стенок из стали марки 06X19H9T и меди марки М1 за счет плавления подаваемой через сопло 3 проволоки 4 электронным пучком 5. Формирование пучка проводили в электронной пушке 6 и его вводили в зону печати через систему магнитной фокусировки 7 с образованием ванны расплава 8. Проволоку подавали от источника 9. Печать изначально стальной части, а после медной проводили по причине слишком избыточного перемешивания компонентов в переходной зоне при одновременной печати двух стенок, что было выяснено в ранее проведенных работах. Диаметр проволоки составлял 1,6 мм; ускоряющее напряжение при печати – 30 кВ; ток пучка варьировался в пределах 40 – 80 мА, с большими значениями при печати медной части.

Образец биметаллического цилиндра получали при аналогичных параметрах процесса, но с использованием наклонно-поворотного стола 12 (рис. 1, б). Стальную часть 10 биметалла получали толщиной в два слоя (примерно 12 – 14 мм), после чего в один слой (6 – 7 мм) наносили медную часть 11. Скорость вращения 13 подбирали аналогичной к использованной для предварительных образцов скорости линейного перемещения. Изначально был получен стальной цилиндр (рис. 1, в), далее проводили печать медного фрагмента (рис. 1, г) и получали биметаллический элемент (рис. 1, д), а после этого проводили токарную обработку изделия с получением готового образца (рис. 1, е).

В качестве подложки при получении образцов использовали сталь марки 12X18H10T. Толщина подложки при печати плоских образцов составляла 5 мм, цилиндрические образцы по причине большей массы и габаритов получали на подложках толщиной 20 мм. Размер плоских образцов составлял 120 × 60 мм при толщине 12 – 14 мм. Стальной цилиндр имел толщину 12 – 14 мм, диаметр и высоту 100 мм.

После изготовления экспериментальных образцов из них вырезали металлографические шлифы и лопатки для механических испытаний на электроэрозионном станке DK7750. Лопатки вырезали с размером рабочей части 12 × 2,7 × 2,7 мм из медной и стальной частей образца, а также из зоны структурного градиента. Металлографические шлифы вырезали из образцов перпендикулярно направлению печати. После осуществляли их шлифовку, полировку и травление. Анализ структуры выполняли с использо-

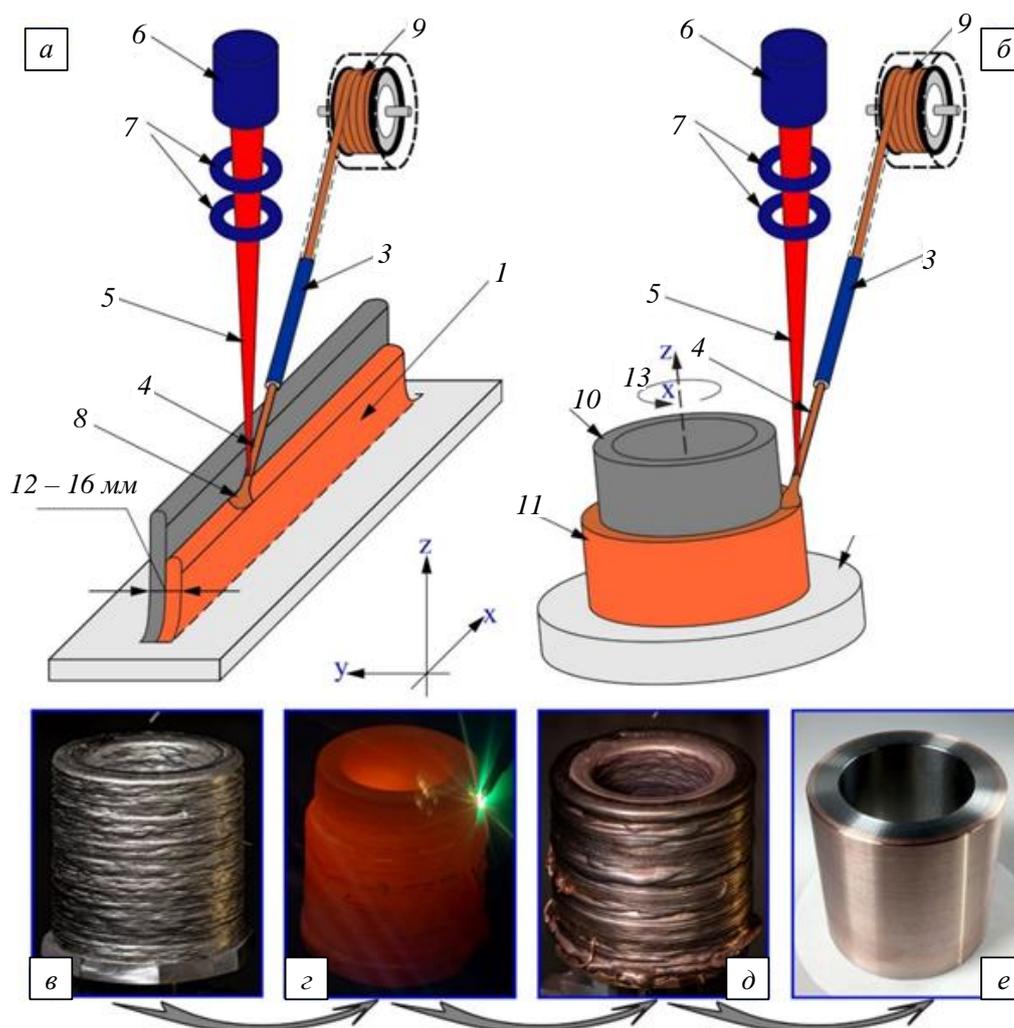


Рис. 1. Схема процесса печати плоского (а) и цилиндрического (б) биметаллических образцов, внешний вид стального цилиндра (в), процесса печати (з), полученного биметаллического образца до (д) и после (е) механической обработки:

1 – образец; 2 – подложка; 3 и 4 – подаваемая проволока и сопло; 5 – электронный пучок; 6 – электронная пушка;

7 – система фокусировки; 8 – ванна расплава; 9 – проволокоподатчик; 10 – стальная часть цилиндра;

11 – медная часть цилиндра; 12 – цилиндрическая подложка; 13 – ось печати и направление вращения

Fig. 1. Scheme of printing process of flat (a) and cylindrical (b) bimetallic samples, appearance of steel cylinder (в), printing process (з), obtained bimetallic sample before (д) and after (е) mechanical processing:

1 – sample; 2 – substrate; 3 and 4 – fed wire and nozzle; 5 – electron beam; 6 – electron gun; 7 – focusing system; 8 – melt bath; 9 – wire feeder; 10 – steel part of cylinder; 11 – copper part of cylinder; 12 – cylindrical substrate;

13 – printing axis and direction of rotation

ванием оптической (Altami MET 1С) и лазерной сканирующей (Olympus LEXT 4100) микроскопии. Механические испытания проводили на установке УТС110М.

### Результаты и их обсуждение

В процессе печати предварительных образцов формировалась однородная и бездефектная структура как основных компонентов, так и градиентной зоны между ними (рис. 2). Для стального фрагмента характерна дендритная структура, а для медного – зеренная. Рост дендритов в стальной части происходил в основном в вертикальном направлении (1 на рис. 2, а, б) или под небольшим углом к нему сходящимися к верхней части наклонными линиями, начинающимися от

краев стенки (2 на рис. 2, а, б). Это обусловлено теплоотводом при печати и геометрией наносимых слоев.

Формирование структуры в медном фрагменте происходит преимущественно в направлении отвода тепла. Так как при нанесении меди тепло отводится также и в стальной участок образца, рост зерен происходит под углом к вертикальной оси (3 на рис. 2, а, в). Градиентная зона в основном является достаточно тонкой, переход от стали к меди является резким (рис. 2, д – жс). В областях по высоте соответствующих центральной части нанесенных слоев граница между компонентами является резкой (рис. 2, е), а в межслойных частях за счет изна-

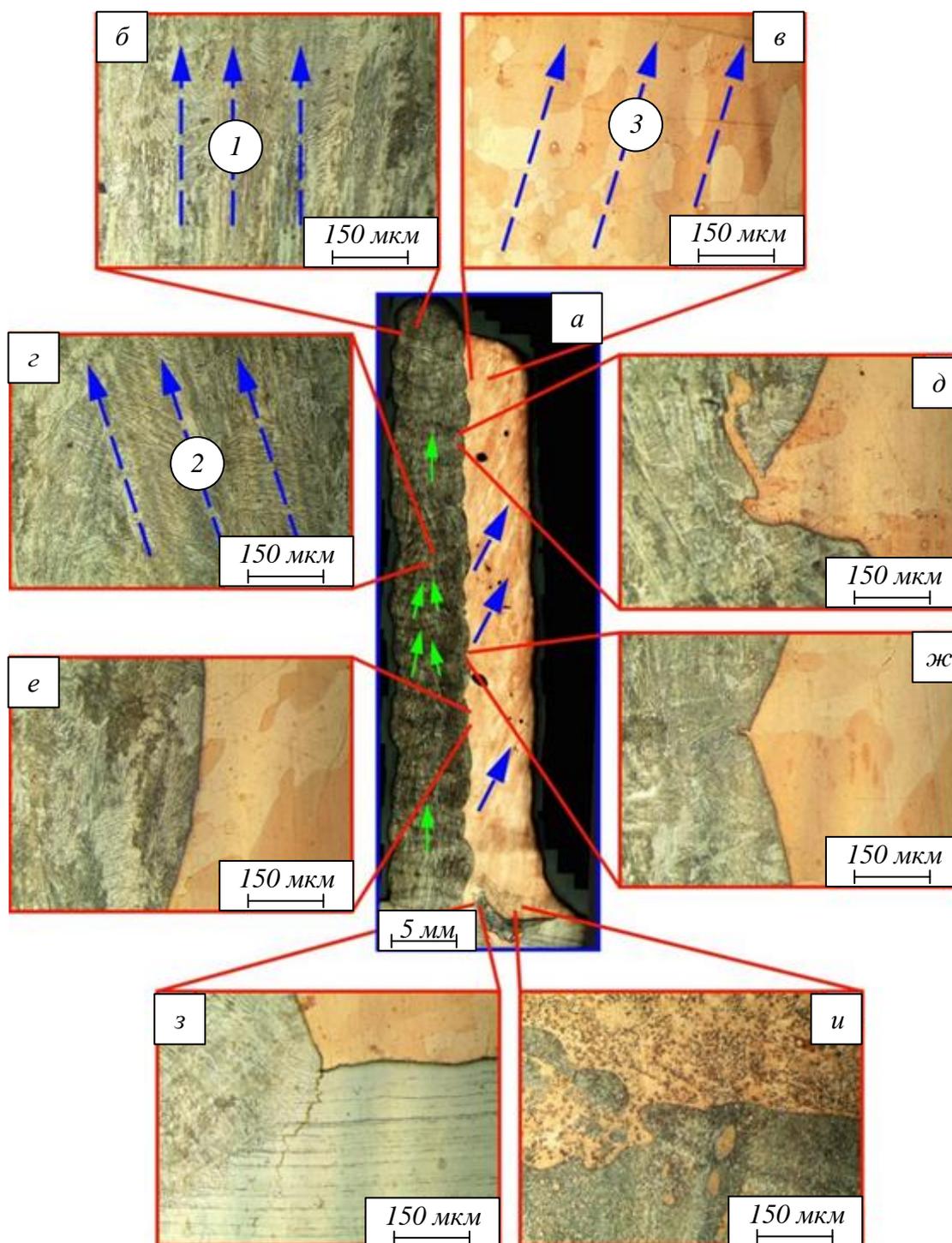


Рис. 2. Формирование структуры биметаллического элемента на основе стали и меди (а), структура в верхней (б, в), центральной (г – ж) и нижней (з, и) частях фрагментов:

1 – рост стали в вертикальном направлении; 2 – рост дендритов под углом к оси выращивания;

3 – рост зерен меди под углом к оси выращивания образца

Fig. 2. Formation of the structure of a bimetallic element based on steel and copper (a), structure in the upper (б, в), central (г – ж) and lower (з, и) parts of the fragments:

1 – growth of steel in the vertical direction; 2 – growth of dendrites at an angle to the vertical axis;

3 – growth of copper grains at an angle to the sample vertical axis

чальных неровностей происходит некоторое углубление меди в сталь (рис. 2, д, ж).

Вблизи подложки из-за значительных термических напряжений и ее оплавления первыми из наносимых слоев происходит образование трещин (рис. 2, з) и механически перемешанных

слоев (рис. 2, и). Формирование таких дефектов при печати меди или медных сплавов происходило и в ранее проведенных исследованиях [3]. В большинстве случаев это обуславливает необходимость удаления материала на расстоянии 5 – 6 мм от подложки, что требуется учиты-

вать при проектировании образцов и процесса их получения проволочным электронно-лучевым методом.

Формирование структуры в биметаллических цилиндрах происходит аналогично плоским образцам, но с рядом изменений, обусловленных в основном отличиями в геометрии образцов (рис. 3). В стальной части изделия выделяется также два – три направления роста (2, 3, 4 на рис. 3, а, в, г, жс, з), два из которых направлены под углом к вертикальной оси, а одно вертикально. В нижней части образцов также отмечается некоторое внедрение материала, замешанного от подложки (рис. 3, б). Структура медной части образцов при этом характеризуется достаточно значительными изменениями в сравнении с плоскими образцами. Общее строение рассматриваемых фрагментов является макроскопически неоднородным, хотя и выделяется наличие участков со структурой из вытянутых столбчатых зерен, ориентированных под углом к вертикальной оси (1, 8 на рис. 3, н). В ряде участков формируется мелкозернистая структура с равноосными зернами (6 на рис. 3, д, е, и, л), которая в стандартных условиях формируется только на границе получаемого образца и подложки. Часть участков медного фрагмента имеют структуру с достаточно крупными зернами, но формой близкой к равноосной (7 на рис. 3, д, м). Несмотря на такую неоднородность в структуре, дефектов в медной части цилиндра не выявлено. Переходная зона между фрагментами является достаточно тонкой, хотя ее величина все-таки больше, чем в плоском образце (от 50 до 100 мкм). Неравномерность проплавления поверхности стального цилиндра при печати на его поверхности медного фрагмента обуславливала неоднородности перемешивания меди и стали в градиентной зоне. Это в свою очередь могло привести к неравномерному процессу образования структуры во всей медной части образца с чередованием участков с мелкодисперсной, крупнозернистой структурой, а также со столбчатыми зернами.

Механические свойства полученных биметаллических элементов, определенные в испытаниях на растяжение в направлении оси выращивания, находятся на достаточном и приемлемом уровне (рис. 4). Для медной части образцов характерны предел прочности до 175 – 180 МПа

и предела текучести до 75 – 80 МПа. Для стали марки 06Х19Н9Т предел текучести в среднем составляет 260 – 265 МПа, а предел прочности – 625 – 630 МПа. Такие характеристики свойственны рассматриваемым материалам после литья. Прочностные свойства переходной зоны занимают промежуточные значения. Пластичность образцов на всех участках находится на достаточно высоком уровне.

### Выводы

Проведенные исследования показывают, что методом проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии возможно формирование крупногабаритных изделий с наличием функционального градиента и удовлетворительными гарантированными прочностными характеристиками. Достаточно однородная и бездефектная структура переходной зоны между компонентами образца характеризуется высокими механическими свойствами, находящимися на промежуточном уровне между свойствами медного и стального фрагментами. Формирование структуры как медного, так и стального участков биметаллических элементов получаем в тесной связи с условиями теплоотвода в них. Структура стали формировалась с преимущественным ростом дендритов в направлении оси выращивания или под небольшим углом к ней. Для плоского образца основным направлением роста зерен в меди была результирующая между вертикальной и горизонтальной осями, так как отвод тепла происходил при печати в стальной фрагмент. В цилиндрическом образце в меди на различных участках формировалась аналогичная структура, но для достаточно большого количества зон образца структура имела относительно равноосное крупно- или мелкозернистое состояние. Такое положение может быть обусловлено неоднородностью нанесения меди с частичным оплавлением пучком стального фрагмента с волнистой поверхностью. В таком случае, где происходило частичное смешивание стали и меди образовывалась мелкодисперсная структура, а где происходило более стабильное ее нанесение образовывались столбчатые вытянутые зерна. Устранение обозначенного эффекта возможно за счет проведения предварительной обработки стального фрагмента после его печати до нанесения на него меди.

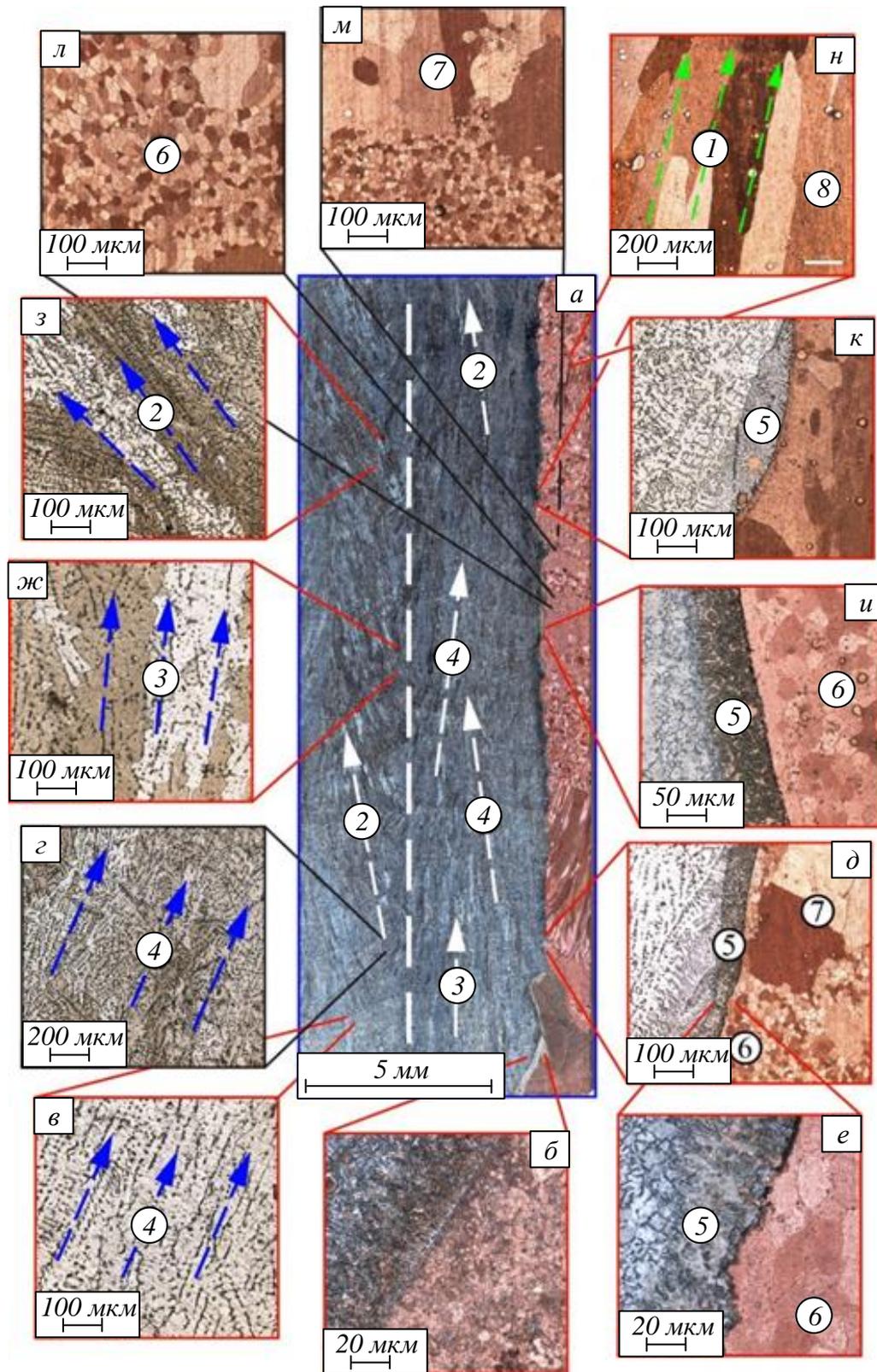


Рис. 3. Формирование структуры биметаллического цилиндра после печати:

1 – рост медных зерен под углом к вертикальной оси; 2, 4 – рост стальных дендритов под углом к вертикальной оси; 3 – рост дендритов стали в вертикальном направлении; 5 – градиентная зона на основе стали; 6 – мелкодисперсная равноосная зеренная структура меди; 7 – крупнозернистая структура меди; 8 – вытянутые столбчатые зерна меди

Fig. 3. Formation of the bimetallic cylinder structure after printing:

1 – growth of copper grains at an angle to the vertical axis; 2, 4 – growth of steel dendrites at an angle to the vertical axis; 3 – growth of steel dendrites in the vertical direction; 5 – gradient zone; 6 – equiaxed grain copper structure; 7 – coarse-grained copper structure; 8 – columnar copper grains

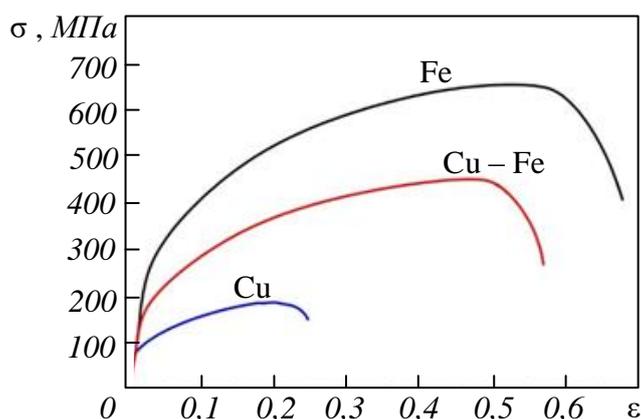


Рис. 4. Диаграмма напряжение – деформация образцов, вырезанных из стальной, медной частей образца и переходной зоны  
Fig. 4. Stress-strain diagrams of specimens cut from steel, copper parts of the specimen and transition zone

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван Я., Коновалов С.В., Чэн С., Панченко И.А., Коток М.М. Исследование влияния термической обработки на сплавы системы Cu – Al, полученные проволочно-дуговым аддитивным способом. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;1(43):89–97.  
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-89-97](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-89-97)
2. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S. Mukherjee, T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112–224.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
3. Zhang X., Pan T., Flood A., Chen Y., Zhang Y., Liou F. Investigation of Copper/Stainless Steel Multi-Metallic Materials Fabricated by Laser Metal Deposition. *Materials Science & Engineering A*. 2021;811:141071.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
4. Tan C., Zhou K., Ma W., Min L. Interfacial characteristic and mechanical performance of maraging steel-copper functional bimetal produced by selective laser melting based hybrid manufacture. *Materials and Design*. 2018;155:77–85.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.064>
5. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(6):479–491.  
<http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922060017>
6. Гэн Я., Панченко И.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чен С. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру аддитивного сплава Al – Mg. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;2(44):13–19.  
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19)
7. Astafurova E.A., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(1):1–11.  
<http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922010015>
8. Su Y., Chen B., Tan C., Song X., Feng J. Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116702.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116702>
9. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Brenne F., Tröster T., Albert Richard H., Schwarze D. Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Advanced engineering materials*. 2014;16:857–861.  
<https://doi.org/10.1002/adem.201300579>
10. Sun Z., Chueh Y.-H., Li L. Multiphase mesoscopic simulation of multiple and functionally gradient materials laser powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*. 2020;35:101448.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101448>
11. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;13:1628–1664.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>

12. Muller P., Hascoet J.-Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2014;20(6):511–522. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0011>
13. Utyaganova V., Filippov A., Tarasov S., Shamarin N., Gurianov D., Vorontsov A., Chumaevskii A., Fortuna S., Savchenko N., Rubtsov V., Kolubaev E. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample. *Materials Characterization*. 2021;172:110867. EDN: NRLOVJ; <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110867>
14. Shen C., Hua X., Reid M., Liss K.-D., Mou G., Pan Z., Huang Y., Li H. Thermal Induced Phase Evolution of Fe–Fe<sub>3</sub>Ni Functionally Graded Material Fabricated Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process: An in-Situ Neutron Diffraction Study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;826(5):154097. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154097>
15. Mohan Kumar S., Rajesh Kannan A., Pravin Kumar N., Pramod R., Siva Shanmugam N., Vishnu A.S., Channabasavanna S.G. Microstructural Features and Mechanical Integrity of Wire Arc Additive Manufactured SS321/Inconel 625 Functionally Gradient Material. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30:5692–5703. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05617-3>
16. Chandrasekaran S., Hari S., Amirthalingam M. Wire Arc Additive Manufacturing of Functionally Graded Material for Marine Risers. *Materials Science and Engineering A*. 2020;792:139530. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2020.139530>
17. Osipovich K.S., Astafurova E.G., Chumaevskii A.V., Kalashnikov K.N., Astafurov S.V., Maier G.G., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Gradient transition zone structure in “steel – copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing. *Journal of Materials Science*. 2020;55:9258–9272. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04549-y>
18. Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Eliseev A.A., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Astafurova E.G. Peculiarities of Structure Formation in Copper/Steel Bimetal Fabricated by Electron-Beam Additive Technology. *Russian Physics Journal*. 2019;62(8):1486–1494. EDN: QKMXZL; <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01867-w>
19. Shu X., Chen G., Liu J., Zhang B., Feng J. Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform fabrication. *Materials Letters*. 2018;213:374–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.11.016>
20. Chen G., Shu X., Liu J., Zhang B., Feng J. Crystallographic texture and mechanical properties by electron beam freeform fabrication of copper/steel gradient composite materials. *Vacuum*. 2020;171:109009. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109009>

## REFERENCES

1. Van Ya., Konovalov S.V., Chen X., Panchenko I.A., Kotok M.M. Investigation of the effect of heat treatment on alloys of the Si – Al system obtained by the wire-arc additive method. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;1(43):89–97. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-89-97](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-89-97)
2. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
3. Zhang X., Pan T., Flood A., Chen Y., Zhang Y., Liou F. Investigation of Copper/Stainless Steel Multi-Metallic Materials Fabricated by Laser Metal Deposition. *Materials Science & Engineering A*. 2021;811:141071. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
4. Tan C., Zhou K., Ma W., Min L. Interfacial characteristic and mechanical performance of maraging steel-copper functional bimetal produced by selective laser melting based hybrid manufacture. *Materials and Design*. 2018;155:77–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.064>
5. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Measurment*. 2022;25(6):479–491. <http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922060017>
6. Geng Ya., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Chen X. Effect of electron beam processing on the structure and properties of the Al – Mg additive alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;2(44):13–19. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19)
7. Astafurova E.A., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A.

- Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanics*. 2022;25(1):1–11. <http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922010015>
8. Su Y., Chen B., Tan C., Song X., Feng J. Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116702. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116702>
  9. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Brenne F., Tröster T., Albert Richard H., Schwarze D. Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Advanced engineering materials*. 2014;16:857–861. <https://doi.org/10.1002/adem.201300579>
  10. Sun Z., Chueh Y.-H., Li L. Multiphase mesoscopic simulation of multiple and functionally gradient materials laser powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*. 2020;35:101448. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101448>
  11. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;13:1628–1664. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>
  12. Muller P., Hascoet J.-Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2014;20(6):511–522. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0011>
  13. Utyaganova V., Filippov A., Tarasov S., Shamarin N., Gurianov D., Vorontsov A., Chumaevskii A., Fortuna S., Savchenko N., Rubtsov V., Kolubaev E. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample. *Materials Characterization*. 2021;172:110867. EDN: NRLOVJ; <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110867>
  14. Shen C., Hua X., Reid M., Liss K.-D., Mou G., Pan Z., Huang Y., Li H. Thermal Induced Phase Evolution of Fe–Fe<sub>3</sub>Ni Functionally Graded Material Fabricated Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process: An in-Situ Neutron Diffraction Study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;826(5):154097. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154097>
  15. Mohan Kumar S., Rajesh Kannan A., Pravin Kumar N., Pramod R., Siva Shanmugam N., Vishnu A.S., Channabasavanna S.G. Microstructural Features and Mechanical Integrity of Wire Arc Additive Manufactured SS321/Inconel 625 Functionally Gradient Material. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30:5692–5703. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05617-3>
  16. Chandrasekaran S., Hari S., Amirhalingam M. Wire Arc Additive Manufacturing of Functionally Graded Material for Marine Risers. *Materials Science and Engineering A*. 2020;792:139530. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2020.139530>
  17. Osipovich K.S., Astafurova E.G., Chumaevskii A.V., Kalashnikov K.N., Astafurov S.V., Maier G.G., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Gradient transition zone structure in “steel – copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing. *Journal of Materials Science*. 2020;55:9258–9272. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04549-y>
  18. Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Eliseev A.A., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Astafurova E.G. Peculiarities of Structure Formation in Copper/Steel Bimetal Fabricated by Electron-Beam Additive Technology. *Russian Physics Journal*. 2019;62(8):1486–1494. EDN: QKMXZL; <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01867-w>
  19. Shu X., Chen G., Liu J., Zhang B., Feng J. Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform fabrication. *Materials Letters*. 2018;213:374–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.11.016>
  20. Chen G., Shu X., Liu J., Zhang B., Feng J. Crystallographic texture and mechanical properties by electron beam freeform fabrication of copper/steel gradient composite materials. *Vacuum*. 2020;171:109009. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109009>

#### Сведения об авторах

**Андрей Валерьевич Чумаевский**, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

**Email:** tch7av@gmail.com

**ORCID:** 0000-0002-1983-4385

**Ксения Сергеевна Осипович**, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

**Email:** osipovich\_k@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-9534-775X

**Вячеслав Максимович Семенчук**, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

**Email:** svm70@ispms.tsc.ru

**ORCID:** 0000-0002-7215-0505

**Сергей Юльевич Тарасов**, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

**Email:** tsy@ispms.ru

**ORCID:** 0000-0003-0702-7639

**Евгений Александрович Колубаев**, д.т.н., заведующий лабораторией локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

**Email:** eak@ispms.tsc.ru

**ORCID:** 0000-0001-7288-3656

**Information about the authors:**

**Andrei V. Chumaevskii**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

**Email:** tch7av@gmail.com

**ORCID:** 0000-0002-1983-4385

**Kseniya S. Osipovich**, Cand. Sci. (Phys.-math.), Junior researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

**Email:** osipovich\_k@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-9534-775X

**Vyacheslav M. Senemchuk**, postgraduate student, Junior researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

**Email:** svm70@ispms.tsc.ru

**ORCID:** 0000-0002-7215-0505

**Sergei Yu. Tarasov**, Dr. Sci. (Eng.), Major Researcher, Laboratory of Surface Hardening Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

**Email:** tsy@ispms.ru

**ORCID:** 0000-0003-0702-7639

**Evgenii A. Kolubaev**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

**Email:** eak@ispms.tsc.ru

**ORCID:** 0000-0001-7288-3656

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 27.11.2023

После доработки 05.12.2023

Принята к публикации 07.12.2023

Received 27.11.2023

Revised 05.12.2023

Accepted 07.12.2023