



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследование структуры и механических свойств алюминиевой бронзы, напечатанной методом электронно-лучевого аддитивного производства

Екатерина Хорошко^{1, а}, Андрей Филиппов^{1, б, *}, Сергей Тарасов^{1, в}, Николай Шамарин^{1, д},
 Евгений Колубаев^{1, е}, Евгений Москвичев^{1, ф}, Дмитрий Лычагин^{2, г}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0001-9078-5662>, eskhoshko@gmail.com, ^б <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>, avf@ispms.ru,

^в <https://orcid.org/0000-0003-0702-7639>, tsy@ispms.ru, ^д <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>, shnn@ispms.ru,

^е <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, eak@ispms.ru, ^ф <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>, em_tsu@mail.ru,

^г <https://orcid.org/0000-0002-0544-9371>, dvl-tomsk@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.51

История статьи:

Поступила: 23 марта 2020

Рецензирование: 21 апреля 2020

Принята к печати: 11 мая 2020

Доступно онлайн: 15 июня 2020

Ключевые слова:

Аддитивные технологии

Алюминиевая бронза

Структура

Механические свойства

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90130. Металлографические исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23.2. Исследования поверхности разрушения проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета.

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие технологий аддитивного производства расширяет возможности изготовления (печати) изделий из разнообразных материалов. Процесс печати осуществляется путем локального высокотемпературного нагрева филамента и подложки, за счет чего формируется ванна расплава. В таких условиях формирование структуры материала происходит в условиях быстрой кристаллизации и повторного циклического нагрева. Важной проблемой печати объемных изделий из большинства конструктивных сплавов является формирование дендритной структуры. Форма и размеры дендритов, а также связанное с ними образование вторичных фаз могут оказывать влияние на прочность и эксплуатационные свойства изделий. **Цель работы:** исследование структуры и механических свойств алюминиевой бронзы, полученной методом электронно-лучевого аддитивного производства. **В работе исследованы** особенности формирования структуры алюминиевой бронзы в зависимости от участка образца. Проведены механические испытания при статическом растяжении и сжатии образцов, вырезанных в продольном и поперечном сечении относительно направления печати. **Методами исследования** являются механические испытания на сжатие и растяжение, оптическая металлография, растровая электронная микроскопия. **Результаты и обсуждение.** На основе анализа металлографических изображений были выделены четыре характерных типа микроструктур, формирующихся на разной высоте от подложки в напечатанном материале. Первый тип – небольшие дендритные зерна с интерметаллидными частицами; второй – небольшие дендритные зерна; третий – крупные столбчатые дендритные зерна; четвертый – широкие дендритные зерна с мелкими включениями вторичной фазы. Формирование этих типов микроструктур обусловлено, во-первых, использованием стальной подложки, во-вторых, изменением условий теплоотвода по мере увеличения высоты образца в процессе печати. На основе проведенных испытаний выявлена значительная анизотропия механических свойств, которая обусловлена направленным характером роста столбчатых дендритных зерен, а также изменением размеров зерна по высоте напечатанного материала. Полученные результаты расширяют фундаментальные представления о процессах структурообразования сплавов в условиях электронно-лучевого аддитивного производства и могут быть использованы при разработке технологий печати изделий из медных сплавов.

Для цитирования: Исследование структуры и механических свойств алюминиевой бронзы, напечатанной методом электронно-лучевого аддитивного производства / Е.С. Хорошко, А.В. Филиппов, С.Ю. Тарасов, Н.Н. Шамарин, Е.А. Колубаев, Е.Н. Москвичев, Д.В. Лычагин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 118–129. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-118-129.

*Адрес для переписки

Филиппов Андрей Владимирович, с.н.с.

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

Тел.: 8 (999) 178-13-40, e-mail: avf@ispms.ru

Введение

Алюминиевая бронза является распространенным конструкционным сплавом, который чаще всего используют в качестве коррозионно-стойкого и/или износостойкого материала для изготовления изделий, работающих в морской воде, водоснабжении и нефтехимии. Для получения сплавов системы Cu-Al традиционно применяются технологии порошковой металлургии [1] и дуговой плавки [2]. Эти технологии имеют существенные ограничения по геометрической форме получаемых изделий. Для обеспечения ресурсоэффективности при изготовлении деталей требуется разработка новых методов производства. К таким относятся современные аддитивные технологии, совмещающие в себе принципы локальной нестационарной металлургии и высокопроизводительное оборудование с числовым программным обеспечением.

Известно, что для получения медных сплавов могут применяться технологии, использующие энергию дугового, лазерного и электронно-лучевого источников [3]. Однако все они накладывают на производственный процесс свои ограничения.

Технологии селективного лазерного плавления или спекания чаще используют для формирования покрытий из никель-алюминиевых бронз, чем для получения объемных трехмерных изделий [4–9]. Одной из наиболее существенных проблем при использовании этих технологий является межслойное окисление материала в процессе печати из-за высокой реакционной способности порошков, в связи с чем снижается качество напечатанного изделия.

Для получения объемных изделий из алюминиевой бронзы, содержащей железо, никель и марганец в качестве дополнительных легирующих элементов чаще всего применяют проволоочную электродугую технологию аддитивного производства [10–15]. К проблемам данной технологии можно отнести структурную неоднородность и межслойное окисление, что значительно влияет на механические свойства и эксплуатационные характеристики напечатанных изделий.

В настоящее время известна только одна работа по формированию алюминиевой бронзы методом электронно-лучевого аддитивного про-

изводства [16]. В этой работе авторы использовали микропорошки меди и алюминия в соотношении 3,65 : 1 соответственно. В результате были получены различные структурные состояния в напечатанном материале: крупные кристаллы α -твердого раствора меди (Cu с 19 ат.% Al), метастабильная β -фаза (Cu с 25 ат.% Al), области эвтектоидов, состоящие из γ_1 -фазы (Cu с 30 ат.% Al) и ламелей (Cu с 19 ат.% Al). Полученный сплав имеет хорошую прочность ($\sigma_B = 486,5$ МПа), но очень низкую пластичность (относительное удлинение 3,2 %). Кроме того, авторы отмечают небольшую анизотропию в прочности и пластичности, выявленную при испытании материала в продольном и поперечном направлении относительно направления печати.

Важной проблемой получения объемных изделий из большинства конструкционных сплавов является формирование дендритной структуры. Форма и размеры дендритов, а также связанное с ними образование вторичных фаз могут оказывать влияние на прочность и эксплуатационные свойства изделий, что ранее было установлено в ряде работ на примере аустенитной коррозионно-стойкой стали [17–19]. Следовательно, для разработки современной технологии аддитивного производства требуется всестороннее изучение особенностей формирования структурно-фазового состава в напечатанном изделии и установление взаимосвязи структура–свойства.

Целью данной работы является исследование структуры и механических свойств алюминиевой бронзы, полученной методом электронно-лучевого аддитивного производства.

Методика исследований

Печать осуществлялась на лабораторной установке (рис. 1, а, б), разработанной и изготовленной в ИФПМ СО РАН [6]. Для получения образцов использовалась проволока алюминиевой бронзы, содержащая 7,5 вес.% алюминия. В качестве подложек использовалась сталь 12Х18Н10Т. Для проведения структурных исследований были напечатаны плоские стенки (рис. 1, в, г) длиной ~90 мм, высотой ~38 мм и толщиной ~5 мм. Режимы печати представлены в таблице. Схема вырезки образцов для проведения экспериментальных исследований показана на рис. 2.

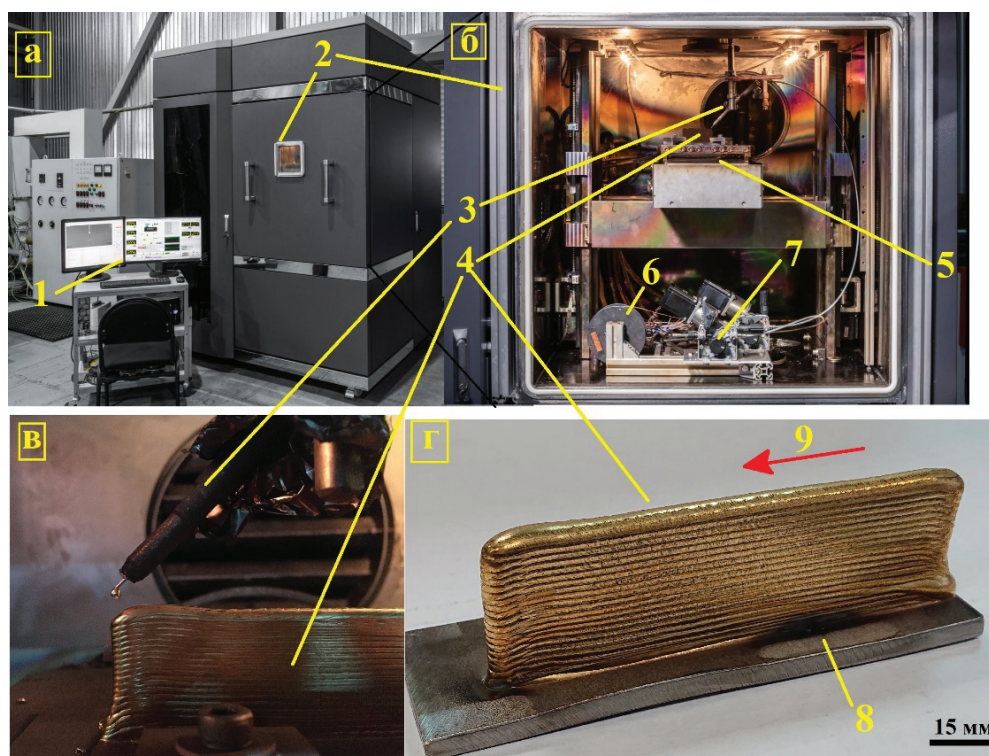


Рис. 1. Фотографии лабораторной установки (а, б) и напечатанного образца (в, г):
1 – пульт управления; 2 – вакуумная камера; 3 – направляющая податчика проволоки;
4 – напечатанный образец; 5 – водоохлаждаемый стол; 6 – катушка с проволокой;
7 – податчик проволоки; 8 – стальная подложка; 9 – направление печати

Fig. 1. Photos of the laboratory setup (a, б) and the printed sample (в, г):

1 – control panel; 2 – vacuum chamber; 3 – guide of the wire feeder; 4 – printed sample;
5 – water-cooled table; 6 – coil with wire; 7 – wire feeder; 8 – steel substrate; 9 – printing direction

Режимы аддитивного производства

Additive Production Modes

Ускоряющее напряжение [кВ]	Ток пучка [мА]	Скорость подачи проволоки [мм/мин]	Скорость перемещения столика [мм/мин]	Диаметр пучка [мм]	Частота развертки пучка [Гц]
30	30	1500	360	4,5	1000

Металлографические исследования выполнены с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа LEXT 4100 (Olympus, Япония). Тесты на сжатие и растяжение осуществлялись на испытательной машине Testsystems 110M-10 (Testsystems, Россия) при комнатной температуре. Микротвердость определена с помощью микротвердомера «Duramin-5» (Stuers A/S, Дания). Анализ поверхностей разрушения выполнен на растровом электронном микроскопе Microtrac SemTrac mini (Microtrac Inc., США) и Tescan MIRA 3 LMU (Tescan, Брно, Чехия).

Результаты и их обсуждение

Микроструктура напечатанных образцов алюминиевой бронзы представлена столбчатыми дендритными зёрнами (рис. 3, а, б). При этом наблюдается разнотернистость на разных участках образца и формирование интерметаллидов вблизи стальной подложки (рис. 3, в–ж). На основе анализа металлографических изображений можно выделить четыре характерных типа микроструктур, формирующихся на разной высоте от подложки в напечатанном материале.

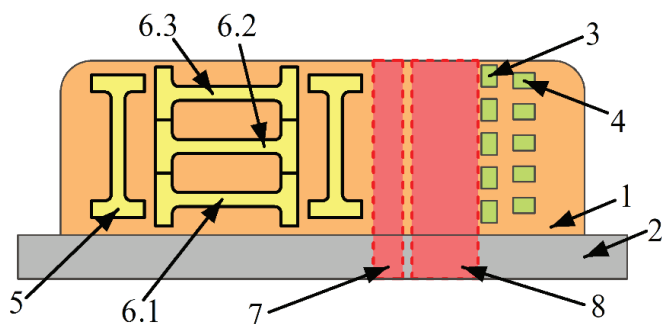


Рис. 2. Схема вырезки образцов для проведения экспериментальных исследований:

1 — напечатанный образец; 2 — стальная подложка; образцы для испытаний на сжатие в сечении поперечном 3 и продольном 4 относительно направления печати; образцы для испытаний на растяжение в сечении поперечном 5 и продольном 6.1, 6.2, 6.3 относительно направления печати

Fig. 2. Scheme for cutting samples for experimental studies:

1 — printed sample; 2 — steel substrate; samples for compression tests in the cross section of the transverse 3 and longitudinal 4 relative to the print direction; samples for tensile tests in the cross section transverse 5 and longitudinal 6.1, 6.2, 6.3 relative to the direction of printing

Первый тип представляет собой слой толщиной 250...350 мкм, располагающийся в нижней части образца вблизи подложки, где формируются дендритные зёрна и интерметаллидные частицы (рис. 3, д, ж). В этом слое дендритные зёрна формируются разнонаправленно и имеют толщину порядка 20...50 мкм, а их длина может достигать 350 мкм. Второй тип микроstructures представлен слоем толщиной до 2 мм, состоящем только из дендритных зёрен сравнительно небольшого размера (толщиной 50...100 мкм и высотой до 1 мм). Эти дендриты имеют искривленную форму. Микроstructures третьего типа расположены в средней части образца и занимают большую часть напечатанного материала. Здесь располагаются столбчатые дендритные зёрна (рис. 3, з), чья толщина неравномерна и увеличивается (достигая ~2 мм) по высоте образца. Длина отдельных зёрен может достигать 30 мм. Такие зёрна имеют прямолинейную форму и расположены под углом ~30° к вертикали, что указывает на направленный характер кристаллизации. Четвертый тип микроstructures находится в верхней части образца, т.е. в нескольких последних на-

печатанных слоях, чья общая толщина достигает ~5 мм (рис. 3, в). Этот тип представлен широкими дендритными зёрнами с мелкими включениями, которые являются вторичной фазой (рис. 3, е). Размеры этих включений составляют ~3 мкм в ширину и ~15 мкм в длину.

Формирование различных типов микроstructures обусловлено рядом явлений и технологических особенностей процесса электронно-лучевого аддитивного производства. Во-первых, из-за использования стальной подложки происходит разбавление и частичное растворение легирующих элементов, входящих в её состав в первом слое напечатанной бронзы. Растворение в первую очередь касается железа и никеля, которые образуют соединения типа Fe_x-Al_y , Ni_x-Al_y , Cu_x-Ni_y при сплавлении с алюминиевой бронзой. Во-вторых, по мере увеличения высоты образца в процессе печати происходит изменение условий теплоотвода. В вышележащих слоях прогрев материала значительно выше из-за аккумуляции тепла в объеме стенки, следовательно, переплавляется больший объем нижележащего слоя. Это способствует увеличению размеров столбчатых дендритных зёрен. В то же время последний слой кристаллизуется с очень высокой скоростью, так как он не подвержен переплаву. Из-за этого становится возможным появление мелких частиц вторичной фазы.

На основе анализа экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний на статическое растяжение и сжатие, установлено, что существует значительная анизотропия механических свойств в объеме напечатанного материала. Образцы, вырезанные в сечении, поперечном относительно направления печати (рис. 4, кривая для образца 5), демонстрируют очень высокую пластичность (относительное удлинение достигает 133%), но низкие значения условного предела текучести ($\sigma_{0.2}$ ~79 МПа) и предела прочности (σ_B ~251 МПа). Образцы, вырезанные в сечении продольном относительно направления печати (рис. 4, кривые для образцов 6.1–6.3), имеют более высокую прочность и меньшую пластичность. Для образца 6.3 значение условного предела текучести составляет 87 МПа, предела прочности 245 МПа, относительное удлинение 75 %. Для образца 6.2 значение условного предела текучести составляет 82 МПа, предела прочности 269 МПа, относительное удлинение 86 %.

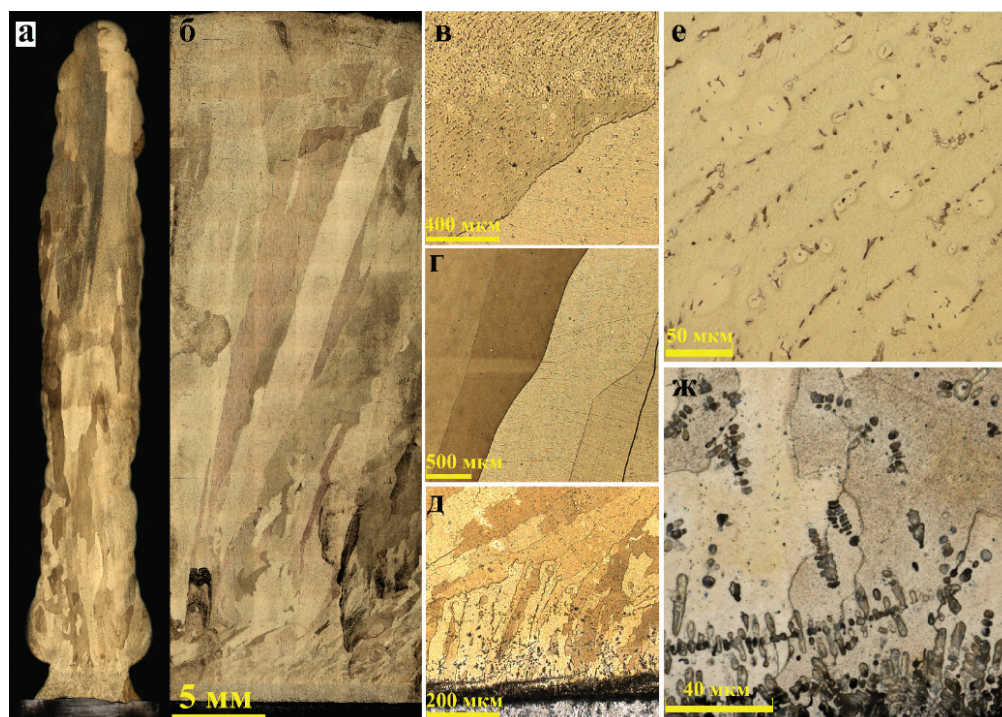


Рис. 3. Металлографические изображения структуры материала в поперечном (а) и продольном (б) сечении напечатанного образца алюминиевой бронзы; увеличенные изображения верхнего (в, е), среднего (г) и нижнего (д, ж) участков образца

Fig. 3. Metallographic images of the structure of the material in the transverse (a) and longitudinal (b) section of a printed sample of aluminum bronze; enlarged images of the upper (в, е), middle (г) and lower (д, ж) sections of the sample

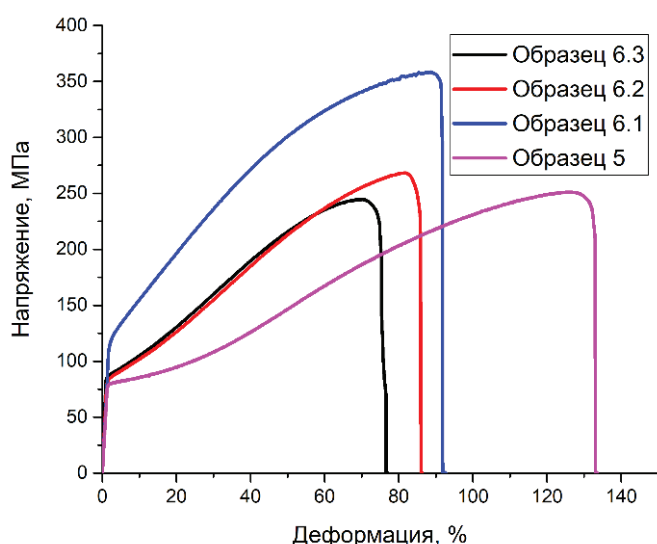


Рис. 4. Кривые напряжение–деформация, полученные в условиях статического растяжения образцов напечатанной алюминиевой бронзы

Fig. 4. The stress–strain curves obtained under conditions of static tension of printed aluminum bronze

Для образца 6.1 значение условного предела текучести равно 112 МПа, предела прочности 359 МПа, относительное удлинение 92 %.

Из полученных данных следует, что более высокая прочность наблюдается у образцов, вырезанных в нижней части напечатанного материала. Как было уже показано (рис. 3), в этой части размер дендритных зерен минимальный и рост зерен происходит поперек области вырезки рабочей части образца, вырезанного для растяжения. Следуя известному закону Холла-Петча, прочность материала в этой области должна быть более высокой за счет меньшего размера зерна. Это обусловлено торможением дислокаций на границах зерен, которые расположены ортогонально действующей нагрузке при растяжении. Высокая пластичность обусловлена внутризеренным дислокационным скольжением, которое эффективно реализуется в крупных столбчатых дендритных зернах при растяжении

образцов, вырезанных вдоль направления их роста (рис. 4, кривая для образца 5). Отсутствие большого числа границ зерен способствует активному дислокационному скольжению [20] без торможения дислокаций с образованием их скоплений и, следовательно, без формирования областей локализации деформации.

Кроме того, на свойства образцов при испытаниях на растяжение оказывает влияние размерный фактор. Это выражается в том, что механические свойства при малых геометрических размерах образца и больших размерах зерна будут в большей степени зависеть от кристаллографической ориентации зерен относительно приложенной нагрузки. Это справедливо для случаев, когда соотношение толщины образца к размерам зерна (среднему размеру зерен, располагающихся в пределах рабочей части лопатки) составляет менее 20. В рассматриваемых образцах это соотношение находится в диапазоне от 1 до 7 для рассматриваемых образцов 5, 6.1–6.3 (рис. 5). Это также вносит свой вклад в анизотропию механических свойств материала, напечатанного в виде тонкой стенки.

У образцов, вырезанных в разных направлениях для испытаний на сжатие, также наблюдается анизотропия механических свойств (рис. 4). Более высокие значения условного предела текучести получены для образцов, вырезанных в

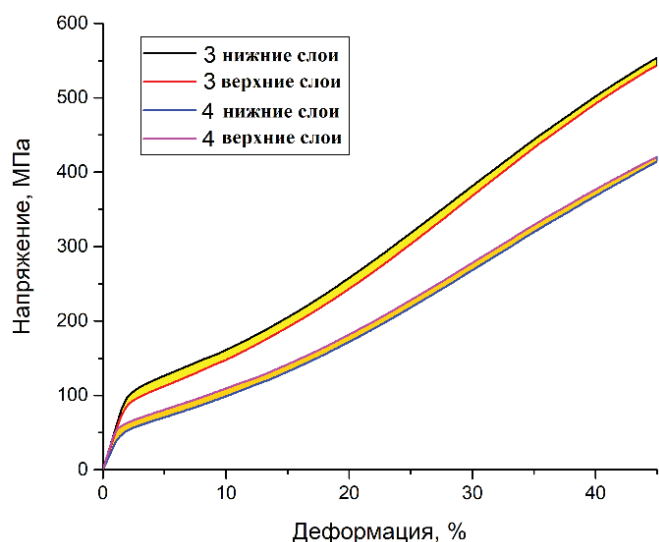


Рис. 5. Кривые напряжение–деформация, полученные в условиях статического сжатия напечатанной алюминиевой бронзы

Fig. 5. The stress–strain curves obtained under conditions of static compression of printed aluminum bronze

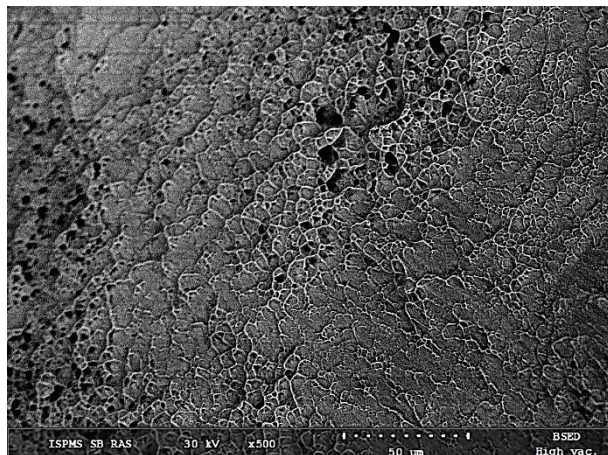
продольном направлении печати ($\sigma_{0.2}$ находится в диапазоне 77...90 МПа), чем у образцов, вырезанных в поперечном направлении ($\sigma_{0.2}$ находится в диапазоне 45...52 МПа). Представленные на графике кривые напряжение–деформация также указывают на факт снижения прочности у образцов, вырезанных из верхних слоев.

У образцов, вырезанных в сечении, поперечном относительно направления печати (рис. 6, а), на поверхности разрушения наблюдается множество мелких ямок, чей размер составляет от 3 до 5 мкм. Это указывает на вязкий характер разрушения, что согласуется с результатами механических испытаний. У образцов, вырезанных в сечении, продольном относительно направления печати (рис. 6, б–г), помимо ямок наблюдаются уступы, которые указывают на «шиферный» тип излома [21]. Как видно из представленных изображений, на поверхности разрушения образцов, вырезанных из нижних слоев (образец 6.1, рис. 6, г), сформировался крупный уступ, а на образцах из средних (образец 6.2, рис. 6, в) и верхних (образец 6.3, рис. 6, б) эти уступы значительно меньших размеров. Шиферный излом связан со структурой образцов и является причиной снижения механических свойств (прочности пластичности) материала, что также согласуется с результатами механических испытаний.

Дорожка отпечатков микротвердости проходит по всему образцу, включая стальную подложку и напечатанную на ней алюминиевую бронзу. Микротвердость в напечатанном материале снижается монотонно от нижней к верхней части (рис. 7). Снижение микротвердости согласуется с увеличением размеров дендритных зерен по мере увеличения высоты напечатанной стенки. Большая неравномерность в значениях микротвердости на участке сплавления бронзы со сталью обусловлена формированием интерметаллидов, твердость которых значительно выше твердости матрицы α -твердого раствора Cu–Al.

Выводы

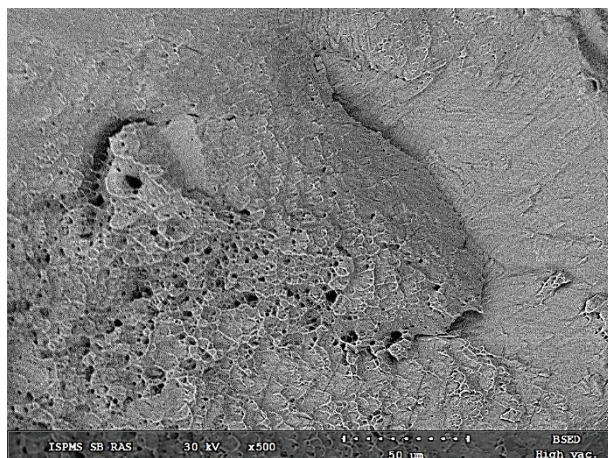
На основе анализа металлографических изображений были выделены четыре характерных типа микроструктур, формирующихся на разной высоте от подложки в напечатанном материале. Первый тип – небольшие дендритные зерна



а



б



в



г

Рис. 6. РЭМ-изображения поверхностей разрушения образцов 5 (а), 6.1 (б), 6.2 (в) и 6.3 (г) после статического растяжения

Fig. 6. SEM-images of fracture surfaces of samples 5 (a), 6.1 (б), 6.2 (в) and 6.3 (г) after static tension

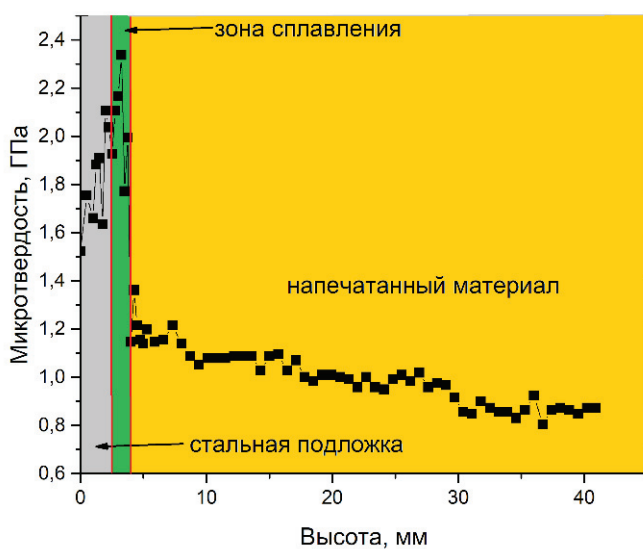


Рис. 7. Изменение микротвердости по высоте образца

Fig. 7. The change in microhardness along the height of the sample

с интерметаллидными частицами; второй – небольшие дендритные зерна; третий – крупные столчатые дендритные зерна; четвертый – широкие дендритные зерна с мелкими включениями вторичной фазы. Формирование этих типов микроструктур обусловлено, во-первых, использованием стальной подложки, во-вторых, изменением условий теплоотвода по мере увеличения высоты образца в процессе печати.

На основе проведенных испытаний выявлена значительная анизотропия механических свойств, которая обусловлена направленным характером роста столчатых дендритных зерен, а также изменением размеров зерна по высоте напечатанного материала. Это выражается в снижении прочности и повышении пластичности у материала в направлении, поперечном относительно траектории печати. Анизотропия свойств при растяжении образцов

сказывается на значении предела прочности (изменение в диапазоне от 245 до 359 МПа), предела текучести (изменение в диапазоне от 82 до 112 МПа), относительного удлинения (изменение в диапазоне от 75 до 133 %). Анизотропия свойств при сжатии образцов сказывается на значении предела текучести (изменение в диапазоне от 45 до 90 МПа).

Полученные результаты расширяют фундаментальные представления о процессах структурообразования сплавов в условиях электронно-лучевого аддитивного производства и могут быть использованы при разработке технологий печати изделий из медных сплавов.

Список литературы

1. Gohar G.A., Manzoor T., Shah A.N. Investigation of thermal and mechanical properties of Cu-Al alloys with silver addition prepared by powder metallurgy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 735. – P. 802–812. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.176.
2. Phase equilibria in the Cu-rich portion of the Cu–Al binary system / X. Liu, I. Ohnuma, R. Kainuma, K. Ishida // *Journal of Alloys and Compounds*. – 1998. – Vol. 264. – P. 201–208. DOI: 10.1016/S0925-8388(97)00235-1.
3. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang // *Progress in Materials Science*. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
4. Laser-Additive repair of cast Ni–Al–Bronze components / X. Cao, P. Wanjara, J. Gholipour, Y. Wang // *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. – Cham: Springer, 2018. – P. 205–216. – DOI: 10.1007/978-3-030-05861-6_19.
5. Underwater laser cladding in full wet surroundings for fabrication of nickel aluminum bronze coatings / X. Feng, X. Cui, G. Jin, W. Zheng, Z. Cai, X. Wen, B. Lu, J. Liu // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 333. – P. 104–114. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.056.
6. Thermal stability and corrosion resistance in a novel nickel aluminum bronze coating by laser cladding / X.P. Tao, S. Zhang, C.L. Wu, C.H. Zhang, J.B. Zhang, Y. Liu // *Materials Research Express*. – 2018. – Vol. 5, N 11. – P. 116527. – DOI: 10.1088/2053-1591/aade7c.
7. Hyatt C.V., Magee K.H., Betancourt T. The effect of heat input on the microstructure and properties of nickel aluminum bronze laser clad with a consumable of composition Cu-9.0Al-4.6Ni-3.9Fe-1.2Mn // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physics of Metals and Materials Science*. – 1998. – Vol. 29. – P. 1677–1690. DOI: 10.1007/s11661-998-0090-5.
8. Effect of the protective materials and water on the repairing quality of nickel aluminum bronze during underwater wet laser repairing / X. Feng, X. Cui, W. Zheng, B. Lu, M. Dong, X. Wen, Y. Zhao, G. Jin // *Optics and Laser Technology*. – 2019. – Vol. 114. – P. 140–145. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.01.034.
9. Effect of Fe and Ni contents on microstructure and wear resistance of aluminum bronze coatings on 316 stainless steel by laser cladding / X.P. Tao, S. Zhang, C.H. Zhang, C.L. Wu, J. Chen, A.O. Abdullah // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 342. – P. 76–84. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.032.
10. Fabrication of copper-rich Cu-Al alloy using the wire-arc additive manufacturing process / B. Dong, Z. Pan, C. Shen, Y. Ma, H. Li // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2017. – Vol. 48. – P. 3143–3151. DOI: 10.1007/s11663-017-1071-0.
11. In-situ wire-feed additive manufacturing of Cu-Al alloy by addition of silicon / Y. Wang, X. Chen, S. Kononov, C. Su, A.N. Siddiquee, N. Gangil // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 487. – P. 1366–1375. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.05.068.
12. Microstructural evolution and mechanical behavior of nickel aluminum bronze Cu-9Al-4Fe-4Ni-1Mn fabricated through wire-arc additive manufacturing / C. Dharmendra, A. Hadadzadeh, B.S. Amirkhiz, G.D. Janaki Ram, M. Mohammadi // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 30. – P. 100872. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.100872.
13. The influence of post-production heat treatment on the multi-directional properties of nickel-aluminum bronze alloy fabricated using wire-arc additive manufacturing process / C. Shen, Z. Pan, D. Ding, L. Yuan, N. Nie, Y. Wang, D. Luo, D. Cuiuri, S. van Duin, H. Li // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 23. – P. 411–421. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.08.008.
14. The morphology, crystallography, and chemistry of phases in wire-arc additively manufactured nickel aluminum bronze / C. Dharmendra, A. Hadadzadeh, B.S. Amirkhiz, M. Mohammadi, // *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. – Cham: Springer, 2019. – P. 443–453. – DOI: 10.1007/978-3-030-05861-6_41.
15. Fabricating superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing / D. Ding, Z. Pan, S. van Duin, H. Li, C. Shen // *Materials (Basel)*. – 2016. – Vol. 9, N 8. – DOI: 10.3390/ma9080652.
16. Wolf T., Fu Z., Körner C. Selective electron beam melting of an aluminum bronze: microstructure and mechanical properties // *Materials Letters*. – 2019. – Vol. 238. – P. 241–244. – DOI: 10.1016/j.matlet.2018.12.015.

17. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel / S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, N.N. Shamarin, S.V. Fortuna, G.G. Maier, E.A. Kolubaev // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 803. – P. 364–370. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.246.
18. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive manufactured 304 stainless steel / S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, N.L. Savchenko, S.V. Fortuna, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev, S.G. Psakhie // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 99, iss. 9-12. – P. 2353–2363. – DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.
19. Gradient transition zone structure in “steel–copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing / K.S. Osipovich, E.G. Astafurova, A.V. Chumaevskii, K.N. Kalashnikov, S.V. Astafurov, G.G. Maier, E.V. Melnikov, V.A. Moskvina, M.Yu. Panchenko, S.Yu. Tarasov, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev // *Journal of Materials Science*. – 2020. – 25 March. – DOI: 10.1007/s10853-020-04549-y.
20. Multilevel model for the description of plastic and superplastic deformation of polycrystalline materials / P.V. Trusov, E.R. Sharifullina, A.I. Shveykin // *Physical Mesomechanics*. – 2019. – Vol. 22. – P. 402–419. – DOI: 10.1134/S1029959919050072.
21. Фридман Я.Б., Гордеева Т.А., Зайцев А.М. Строение и анализ изломов металлов. – М.: МАШ-ГИЗ, 1960. – 128 с.

Конфликт интересов

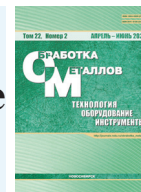
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Study of the Structure and Mechanical Properties of Aluminum Bronze Printed by Electron Beam Additive Manufacturing

*Ekaterina Khoroshko^{1, a}, Andrey Filippov^{1, b, *}, Sergei Tarasov^{1, c}, Nikolay Shamarin^{1, d},
Evgeny Kolubaev^{1, e}, Evgeny Moskvichev^{1, f}, Dmitry Lychagin^{2, g}*

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9078-5662>,  eskhoroshko@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>,  avf@ispms.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0003-0702-7639>,  tsy@ispms.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>,  shnn@ispms.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>,  eak@ispms.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>,  em_tsu@mail.ru,

^g  <https://orcid.org/0000-0002-0544-9371>,  dvl-tomsk@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23 March 2020

Revised: 21 April 2020

Accepted: 11 May 2020

Available online: 15 June 2020

Keywords:

Additive technology

Aluminum bronze

Structure

Mechanical properties

Funding

The study was carried out with the financial support of the RFBR according to the research Project No. 19-38-90130. Metallographic studies were carried out as part of the Program of fundamental scientific research of state academies of sciences for 2013–2020, direction III.23.2. The scanning electron microscope investigations were performed using the equipment of the Analytical Center of Geochemistry of Natural Systems of Tomsk State University.

ABSTRACT

Introduction. The development of additive manufacturing technologies expands the possibilities of manufacturing (printing) products using a variety of materials. The printing process is carried out by local high-energy heating of the filament and substrate, due to which a molten bath is formed. Under such conditions, the formation of the structure of the material occurs under conditions of rapid crystallization and repeated cyclic heating. An important problem in printing bulk products from most structural alloys is the formation of a dendritic structure. The shape and size of dendrites, as well as the formation of secondary phases associated with it, can affect the strength and performance of products. **The purpose of the work** is to study the structure and mechanical properties of aluminum bronze obtained by the method of electron beam additive production. **In this work**, the features of the formation of the structure of aluminum bronze depending on the area of the sample are studied. Mechanical tests are carried out under static tension and compression of samples cut in longitudinal and cross sections relative to the direction of printing. **The methods of investigation** are mechanical tests for compression and tension, optical metallography, scanning electron microscopy. **Results and discussion.** Based on the analysis of metallographic images, four characteristic types of microstructures are formed at different heights from the substrate in the printed material. The first type is small dendritic grains with intermetallic particles. The second is small dendritic grains. The third is large columnar dendritic grains. Fourth are wide dendritic grains with small inclusions of the secondary phase. The formation of these types of microstructures is due, firstly, to the use of a steel substrate, and secondly, to a change in heat removal conditions as the height of the sample increases during printing. Based on the tests, a significant anisotropy of the mechanical properties was revealed, which is due to the directed nature of the growth of columnar dendritic grains, as well as a change in grain size along the height of the printed material. The obtained results expand the fundamental ideas about the processes of structure formation of alloys in the conditions of electron-beam additive production and can be used in developing technologies for printing products made of copper alloys.

For citation: Khoroshko E.S., Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Shamarin N.N., Kolubaev E.A., Moskvichev E.N., Lychagin D.V. Study of the structure and mechanical properties of aluminum bronze printed by electron beam additive manufacturing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 118–129. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-118-129. (In Russian).

* Corresponding author

Filippov Andrey V., Senior Researcher

Institute of Strength Physics and Materials Science
of the Siberian Branch of the RAS,

per. Akademicheskii 2/4,

634055, Tomsk, Russian Federation

Tel.: 8 (999) 178-13-40, e-mail: avf@ispms.ru

References

1. Gohar G.A., Manzoor T., Shah A.N. Investigation of thermal and mechanical properties of Cu-Al alloys with silver addition prepared by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 735, pp. 802–812. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.176.
2. Liu X., Ohnuma I., Kainuma R., Ishida K. Phase equilibria in the Cu-rich portion of the Cu–Al binary system. *Journal of alloys and compounds*, 1998, vol. 264, pp. 201–208. DOI: 10.1016/S0925-8388(97)00235-1.
3. 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, vol. 92, pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
4. Cao X., Wanjara P., Gholipour J., Wang Y. Laser-Additive repair of cast Ni–Al–Bronze components. *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, Cham, Springer, 2018, pp. 205–216. DOI: 10.1007/978-3-030-05861-6_19.
5. Feng X., Cui X., Jin G., Zheng W., Cai Z., Wen X., Lu B., Liu J. Underwater laser cladding in full wet surroundings for fabrication of nickel aluminum bronze coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 333, pp. 104–114. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.056.
6. Tao X.P., Zhang S., Wu C.L., Zhang C.H., Zhang J.B., Liu Y. Thermal stability and corrosion resistance in a novel nickel aluminum bronze coating by laser cladding. *Materials Research Express*, 2018, vol. 5, no. 11, p. 116527. DOI: 10.1088/2053-1591/aade7c.
7. Hyatt C.V., Magee K.H., Betancourt T. The effect of heat input on the microstructure and properties of nickel aluminum bronze laser clad with a consumable of composition Cu-9.0Al-4.6Ni-3.9Fe-1.2Mn. *Metallurgical and Materials Transactions A Physics of Metals and Materials Science*, 1998, vol. 29, pp. 1677–1690. DOI: 10.1007/s11661-998-0090-5.
8. Feng X., Cui X., Zheng W., Lu B., Dong M., Wen X., Zhao Y., Jin G. Effect of the protective materials and water on the repairing quality of nickel aluminum bronze during underwater wet laser repairing. *Optics and Laser Technology*, 2019, vol. 114, pp. 140–145. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.01.034.
9. Tao X.P., Zhang S., Zhang C.H., Wu C.L., Chen J., Abdullah A.O. Effect of Fe and Ni contents on microstructure and wear resistance of aluminum bronze coatings on 316 stainless steel by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 342, pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.032.
10. Dong B., Pan Z., Shen C., Ma Y., Li H. Fabrication of copper-rich Cu-Al alloy using the wire-arc additive manufacturing process. *Metallurgical and Material Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2017, vol. 48, pp. 3143–3151. DOI: 10.1007/s11663-017-1071-0.
11. Wang Y., Chen X., Konovalov S., Su C., Siddiquee A.N., Gangil N. In-situ wire-feed additive manufacturing of Cu-Al alloy by addition of silicon. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 487, pp. 1366–1375. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.05.068.
12. Dharmendra C., Hadadzadeh A., Amirkhiz B.S., Janaki Ram G.D., Mohammadi M. Microstructural evolution and mechanical behavior of nickel aluminum bronze Cu-9Al-4Fe-4Ni-1Mn fabricated through wire-arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 30, pp. 100872. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100872.
13. Shen C., Pan Z., Ding D., Yuan L., Nie N., Wang Y., Luo D., Cuiuri D., Duin S. van, Li H. The influence of post-production heat treatment on the multi-directional properties of nickel-aluminum bronze alloy fabricated using wire-arc additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 23, pp. 411–421. DOI: 10.1016/j.addma.2018.08.008.
14. Dharmendra C., Hadadzadeh A., Amirkhiz B.S., Mohammadi M. The morphology, crystallography, and chemistry of phases in wire-arc additively manufactured nickel aluminum bronze. *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, 2019, pp. 443–453. DOI: 10.1007/978-3-030-05861-6_41.
15. Ding D., Pan Z., Duin S. van, Li H., Shen C. Fabricating superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing. *Materials (Basel)*, 2016, vol. 9, no. 8. DOI: 10.3390/ma9080652.
16. Wolf T., Fu Z., Körner C. Selective electron beam melting of an aluminum bronze: microstructure and mechanical properties. *Materials Letters*, 2019, vol. 238, pp. 241–244. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.12.015.
17. Tarasov S.Y., Filippov A.V., Shamarin N.N., Fortuna S.V., Maier G.G., Kolubaev E.A. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 803, pp. 364–370. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.246.
18. Tarasov S.Y., Filippov A.V., Savchenko N.L., Fortuna S.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A., Psakhie S.G. Effect of heat input on phase content, crystalline lattice parameter, and residual strain in wire-feed electron beam additive

manufactured 304 stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, iss. 9-12, pp. 2353–2363. DOI: 10.1007/s00170-018-2643-0.

19. Osipovich K.S., Astafurova E.G., Chumaevskii A.V., K.N. Kalashnikov, 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. DOI: 10.1007/s10853-020-04549-y.

20. Trusov P.V., Sharifullina E.R., Shveykin A.I. Multilevel model for the description of plastic and superplastic deformation of polycrystalline materials. *Physical Mesomechanics*, 2019, vol. 22, pp. 402–419. DOI: 10.1134/S1029959919050072.

21. Fridman Ya.B., Gordeeva T.A., Zaitsev A.M. *Stroenie i analiz izlomov metallov* [The structure and analysis of fractures of metals]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1960. 128 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).