



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Оценка влияния тепловых параметров на процесс электронно-лучевой печати титанового сплава ВТ6

Кирилл Калашиников^{a, *}, Денис Гурьянов^b, Анна Зыкова^c, Сергей Фортуна^d

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

^a  <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>,  kkn@ispms.tsc.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0725-1219>,  desa-93@mail.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>,  zykovaap@mail.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0002-2749-8094>,  s_fortuna@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 658.5.012.1

История статьи:

Поступила: 02 марта 2020
 Рецензирование: 30 марта 2020
 Принята к печати: 14 апреля 2020
 Доступно онлайн: 15 июня 2020

Ключевые слова:

Аддитивные технологии
 Электронный луч
 Титановый сплав
 Титановая проволока

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.11

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время для создания ответственных изделий из титановых сплавов, таких как шар-баллоны высокого давления для ракетных двигателей, используются в основном традиционные методы получения, в том числе изотермическая штамповка/формование полусфер из заготовок титановых сплавов с последующей сваркой. В основном такие методики являются сложными многостадийными процессами, в связи с чем производство титановых шар-баллонов может занимать очень продолжительное время и влечет за собой большие материальные затраты. Рассматриваемая в данной работе технология проволоочного электронно-лучевого аддитивного производства успела зарекомендовать себя в мировом научном и промышленном сообществе как технология, позволяющая повысить производительность процесса изготовления различных металлических деталей, а также сократить затраты материала за счет минимизации механических обработок. Однако несмотря на большой ряд преимуществ данной технологии, технологические особенности процесса, включающие геометрические параметры печатаемой детали, такие как форма и высота конструкции, угол наклона стенок конструкции от плоскости печати и другие, оказывают существенное влияние на формируемую структуру. Это связано с тем, что тепловые параметры процесса для разных конфигураций печатаемого изделия будут оказывать разное влияние на формирование структуры. В связи с этим **целью данной работы** является проведение анализа влияния тепловых параметров на процесс печати изделий из титанового сплава ВТ6 методом электронно-лучевого аддитивного производства, чтобы выявить закономерности формирования структуры и свойств материала при различных параметрах процесса. **Результаты и обсуждение.** Проведенные исследования показали, что при различных комбинациях параметров процесса электронно-лучевой 3D-печати титановым сплавом ВТ6 происходит незначительное изменение макроструктуры полученных образцов. Однако за счет разных тепловложений и скоростей кристаллизации наблюдаются различия в микроструктуре и, следовательно, в механических свойствах. Значения предела прочности и предела текучести для полученных образцов варьируются в пределах от 851 и 796 МПа до 676 и 574 МПа соответственно.

Для цитирования: Оценка влияния тепловых параметров на процесс электронно-лучевой печати титанового сплава ВТ6 / К.Н. Калашиников, Д.А. Гурьянов, А.П. Зыкова, С.В. Фортуна // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 41–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-41-52.

Введение

В последнее десятилетие технологии промышленного производства металлических изделий сделали большой шаг вперед благодаря развитию методов аддитивного производства, также известных как 3D-печать. Это связано в первую очередь с тем, что в сравнении с тради-

ционными методами изготовления, такими как литье, формование или механическая обработка, они обеспечивают ряд существенных преимуществ [1, 2]. К таким преимуществам можно отнести высокую производительность аддитивных технологий (АТ), сокращение этапов производства и обработки деталей, а также сокращение затрат материалов, что оказывает благоприятное влияние как с экономической, так и с экологической точки зрения [3, 4]. Все это позволило аддитивным технологиям привлечь на себя внимание таких крупнейших мировых корпораций, как Boeing, Airbus и Lockheed Martin, которые

*Адрес для переписки

Калашиников Кирилл Николаевич, м.н.с.
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
 пр. Академический 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: +7-913-883-69-62, e-mail: kkn@ispms.tsc.ru

вкладывают большие средства на развитие этой отрасли.

Из литературы известно, что для 3D-печати металлических изделий может быть использован широкий спектр металлических материалов: алюминиевые сплавы [5, 6], в том числе специально разработанные для АТ [7, 8], конструкционные стали, в том числе аустенитные и ферритно-перлитные [9, 10], никелевые сплавы [11, 12], титановые сплавы [13–15] и т. д. При этом АТ подразделяют на два типа в зависимости от используемых сырьевых материалов. Первый тип – порошковые АТ, наиболее известными представителями которых являются методы селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting, SLM) и электронно-лучевого плавления (Electron-Beam Melting, EBM), которые характеризуются медленной скоростью процесса печати, но при этом высокой точностью построения заданных трехмерных моделей малогабаритных изделий [16, 17]. Второй тип – проволочные АТ, к которым относятся электронно-лучевое аддитивное производство (Electron-Beam Additive Manufacturing, EBAM) и электронно-дуговое аддитивное производство (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM). Они предназначены для производства крупногабаритных металлических изделий, не требующих высокой точности, и характеризуются высокими скоростями процесса [18, 19].

Настоящая работа посвящена исследованию процесса электронно-лучевого аддитивного производства из проволоки титанового сплава ВТ6. В ранее проведенных работах было выявлено влияние геометрии подачи проволоки на процесс формирования изделий этим методом [20]. Полученные данные показали, что такие параметры, как форма и высота печатаемой конструкции, угол наклона стенок конструкции от плоскости печати, а также ряд других факторов оказывают существенное влияние на формируемую структуру. Это позволяет сделать предположение, что тепловые параметры процесса для разных конфигураций печатаемого изделия будут оказывать разное влияние на формирование структуры. В связи с этим необходимо проведение анализа влияния тепловых параметров на процесс печати изделий из титанового сплава ВТ6 методом электронно-лучевого аддитивного производства, для того чтобы выявить законо-

мерности формирования структуры и свойств материала при различных параметрах процесса 3D-печати.

Методика экспериментального исследования

Получение образцов для исследований было выполнено с использованием специально разработанной установки для проволочного электронно-лучевого аддитивного производства в ИФПМ СО РАН, Томск, Россия. Схема получения образцов и общий вид вакуумной камеры лабораторной установки показаны на рис. 1. В качестве подложки был использован пакет из пластины нержавеющей стали толщиной 6,0 мм и пластины из технического титана ВТ1-0 толщиной 2,5 мм. Пакет размещался следующим образом (рис. 2): пластина из нержавеющей стали 2 устанавливалась на охлаждаемый медный стол 1, сверху устанавливалась пластина из технического титана 3, после чего пакет пластин фиксировался с помощью специальных зажимов 4. В качестве сырья для аддитивного производства была выбрана сплошная проволока титанового сплава ВТ6 диаметром 1 мм.

Для анализа влияния различных режимов печати был предложен подход, основанный на РДМУ 109, согласно которому были выбраны три управляемых параметра: мощность электронного пучка (ускоряющее напряжение постоянно, варьируется ток пучка), линейная скорость печати и коэффициент заполнения слоя. Под коэффициентом заполнения слоя понимается коэффициент $k = 1$, где 1 соответствует 100 %-му заполнению объема одного слоя расплавленным материалом проволоки, количество которой рассчитано автоматически исходя из геометрических параметров печатаемого образца. Другими словами, путем изменения данного коэффициента задается объем материала, используемого для формирования одного слоя изделия. Линейная скорость печати – это скорость, с которой перемещается рабочий стол в процессе нанесения слоя. Параметры, использованные в данном эксперименте, показаны в табл. 1 и 2. В табл. 1 показаны минимальные (–) и максимальные (+) значения параметров, в то время как в табл. 2 продемонстрировано, каким режимам соответствуют определенные комбинации максимальных и минимальных значений параметров.

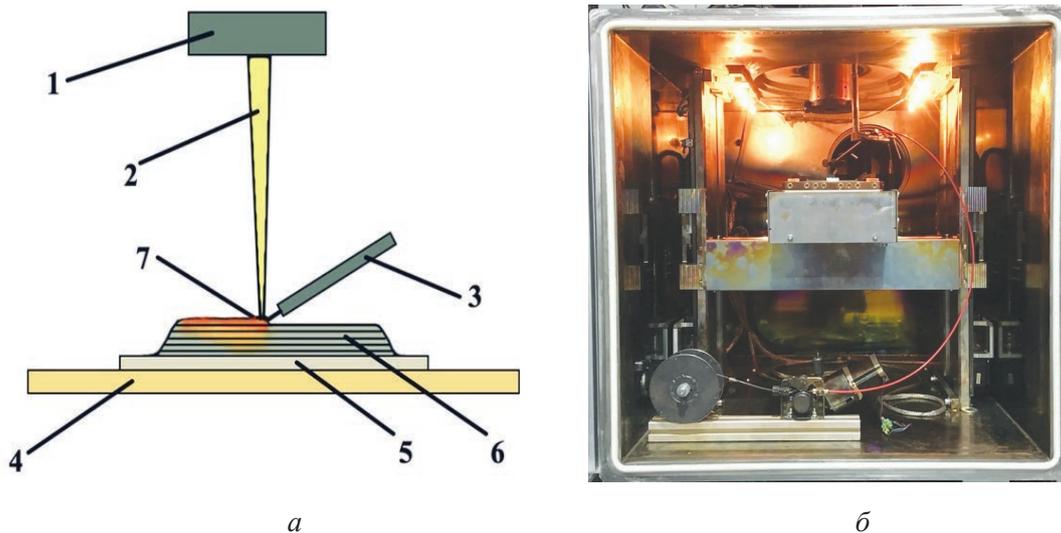


Рис. 1. Схема 3D-печати образцов в форме «стенок» (а) и фотография вакуумной камеры установки для электронно-лучевого аддитивного производства (б):

1 – электронно-лучевая пушка; 2 – электронный луч; 3 – устройство подачи проволоки; 4 – охлаждаемый медный стол; 5 – подложка; 6 – послойно нанесенный материал; 7 – ванна расплава

Fig. 1. The scheme of wall-shaped sample 3D-printing (a) and photography of vacuum chamber of electron-beam additive manufacturing equipment (b):

1 – electron-beam gun; 2 – electron beam; 3 – wire feeder; 4 – cooled operation table; 5 – substrate; 6 – layer-by-layer deposited material; 7 – molten pool

Таблица 1

Table 1

Параметры процесса электронно-лучевого аддитивного производства
Parameters of the electron-beam additive manufacturing process

Параметр	Минимальное значение (-)	Максимальное значение (+)
Напряжение (U)	30 кВ	
Ток (I)	25 мА	40 мА
Линейная скорость (V)	180 мм/мин	350 мм/мин
Коэффициент заполнения слоя (k)	0,9	1,2

Таблица 2

Table 2

Комбинации параметров для серии из 8 экспериментов
Combinations of parameters for a series of 8 experiments

Номер серии эксперимента	Ток	Линейная скорость	Коэффициент заполнения (k)
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Печатаемые образцы представляли собой вертикальные «стенки» со следующими заданными геометрическими параметрами: длина – 100,0 мм, ширина – 6,0 мм, высота – 40 мм.

Схема вырезки образцов для проведения исследований изображена на рис. 2, б. Для проведения механических испытаний на растяжение из полученных «стенок» вырезались образцы в форме лопаток б. Для подготовки образцов к структурным исследованиям образец вырезали в поперечном сечении 5, затем поверхность подготавливалась с использованием шлифовальной бумаги различной зернистости и алмазной па-

сты, после чего подвергалась химическому травлению для выявления микроструктуры.

Исследование структуры проводили на металлографическом микроскопе АЛЬТАМИ MET 1С и лазерном сканирующем микроскопе OLYMPUS LEXT OLS4100. Механические свойства образцов оценивали при испытаниях на растяжение на универсальной испытательной машине УТС 110 М-100. Химический состав образцов, полученных при различных режимах, определялся с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Niton XL3t.

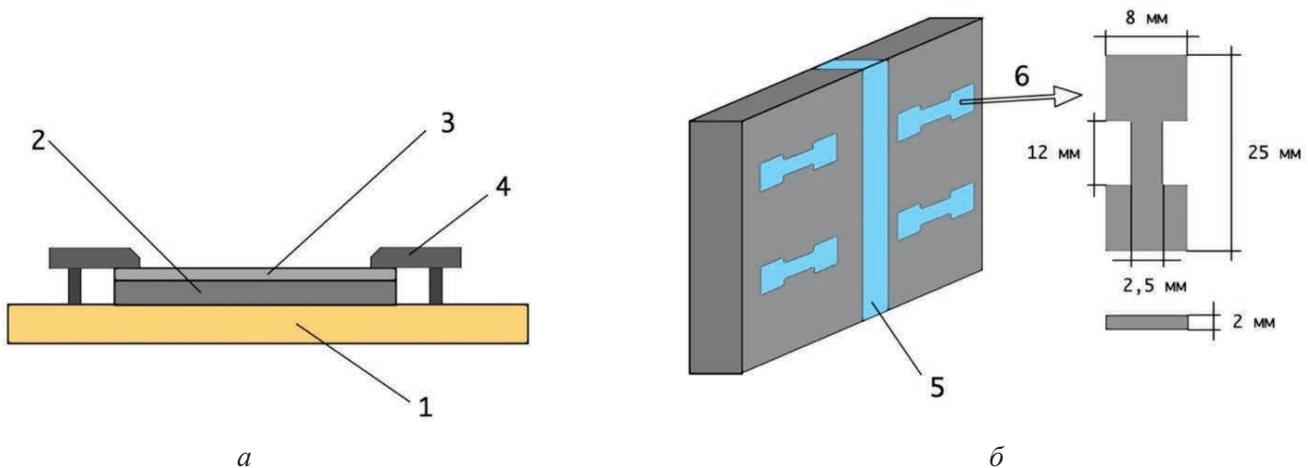


Рис. 2. Схема установки пакета пластин в качестве подложки (а) и схема вырезки образцов для исследований (б):

1 – охлаждаемый медный стол; 2 – стальная пластина; 3 – пластина ВТ1-0; 4 – прижимы; 5 – образец для металлографических исследований; 6 – лопатки для испытаний на растяжение

Fig. 2. Scheme of plate package placing as a substrate:

1 – cooled copper table; 2 – steel plate; 3 – GRADE-0 Titanium plate; 4 – clamps; 5 – sample for metallographical studies; 6 – tensile testing specimens

Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что не все из использованных параметров демонстрируют стабильность процесса электронно-лучевого аддитивного производства. Как видно из рис. 3, наиболее правильно сформированные образцы удалось получить с использованием режимов № 5 и 8, тогда как режимы № 3 и 7 привели к абсолютно отрицательному результату. Если представить параметры теплового воздействия (мощность пучка и скорость печати) в виде погонной энергии, также известной как тепловложение ($E=UI/V$, где E – погонная энер-

гия; U – ускоряющее напряжение; I – ток пучка; V – линейная скорость печати), мы получим, что для образцов № 3 и 7 погонная энергия составляет 128,5 Дж/мм. Следовательно, такое количество энергии недостаточно для формирования образцов из сплава ВТ6. Что касается образцов № 5 и 8, им соответствуют значения 250 и 205 Дж/мм соответственно. При этом образцы № 1 и 4, полученные при соответствующих тепловых параметрах, демонстрируют худшие результаты с точки зрения формирования изделия, так как приводят к чрезмерному нагреву материала ввиду меньшего количества подаваемой проволоки. Образцы, полученные по режимам № 2 и 6,

характеризующиеся погонной энергией, равной 400 Дж/мм, также демонстрируют нарушения процесса печати независимо от количества подаваемого материала, что позволяет сделать вывод о чрезмерных тепловложениях в данных режимах.

Макроструктура образцов, полученных по режимам № 1 и 4, характеризуется крупной зернистой структурой. Размер зерен увеличивается от подложки в направлении роста изделия, при этом одно зерно может проходить через несколько слоев «стенки» (рис. 4, а, б). Микроструктура образцов сплава ВТ6, полученных по данным

режимам, состоит из β -фазы и игольчатой мартенситной α -фазы, размер, форма и объемная доля которой меняется от нижней части образцов к верхней. Наличия пор, трещин и других дефектов в образцах по режимам № 1 и 4 не обнаружено.

Макроструктура образцов, полученных по режиму № 2 и 6 (рис. 5), аналогична макроструктуре образцов, полученных по режимам № 1 и 4, и также характеризуется крупнозернистой структурой, размер структурных элементов которой увеличивается от подложки к верхней части образца. В нижних частях образцов, полу-

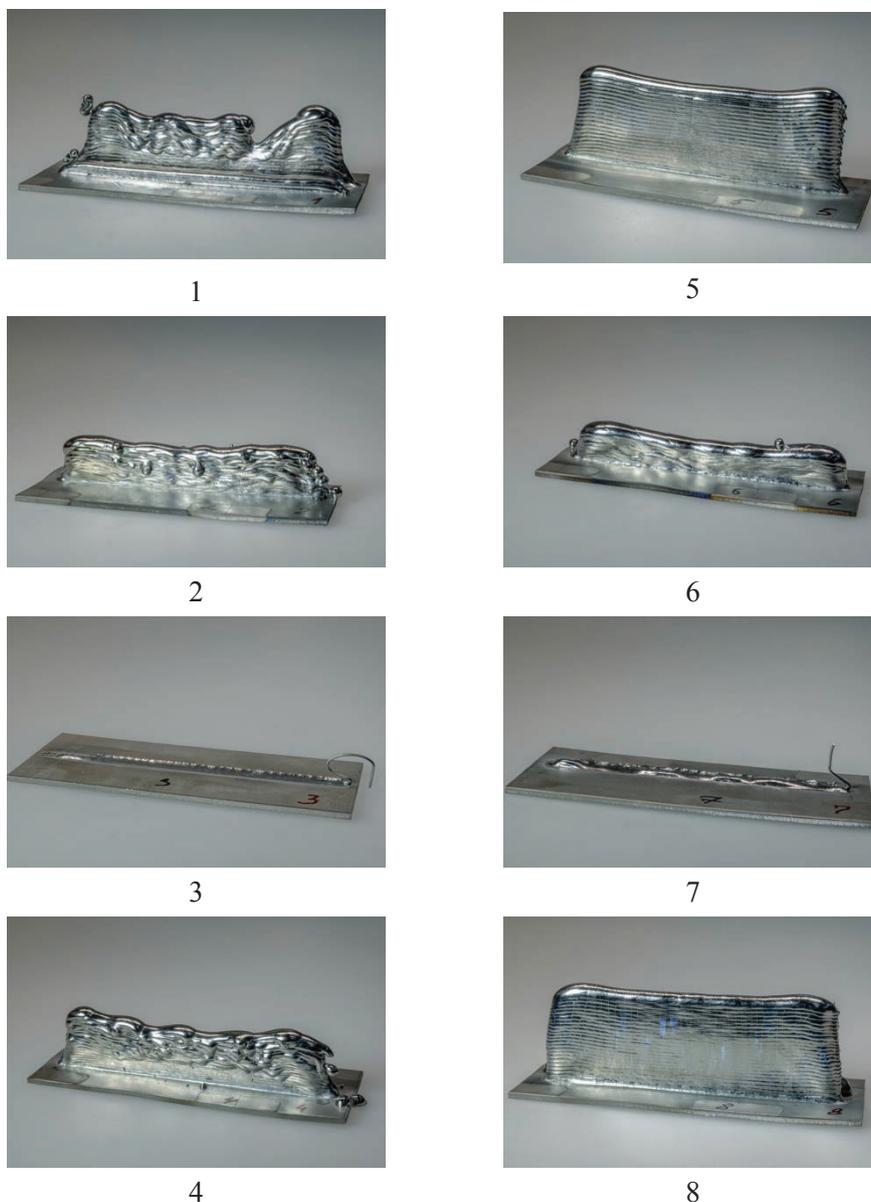


Рис. 3. Общий вид образцов, полученных по режимам № 1–8

Fig. 3. Overview of samples obtained by modes № 1–8

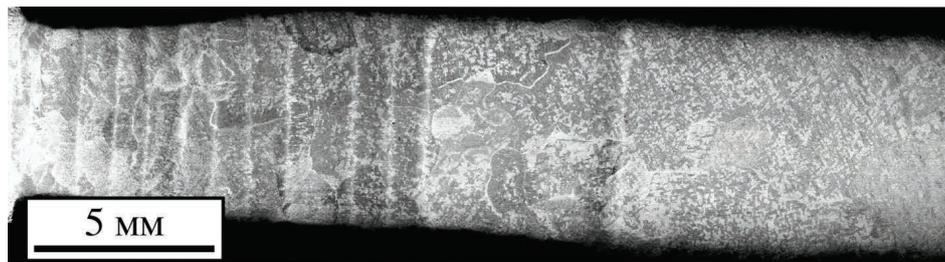
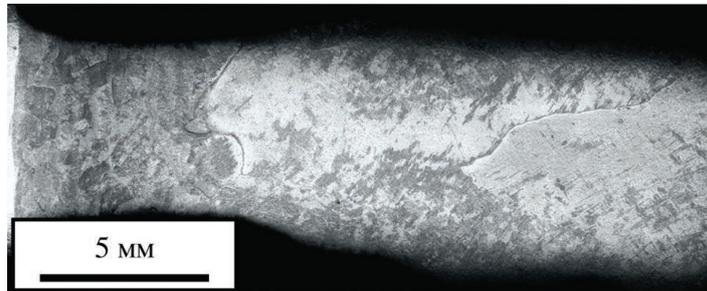

a

б

Рис. 4. Макроструктура образцов, полученных по режимам № 1 (*a*) и 4 (*б*)

Fig. 4. Macrostructure of samples obtained by modes № 1 (*a*) and 4 (*б*)

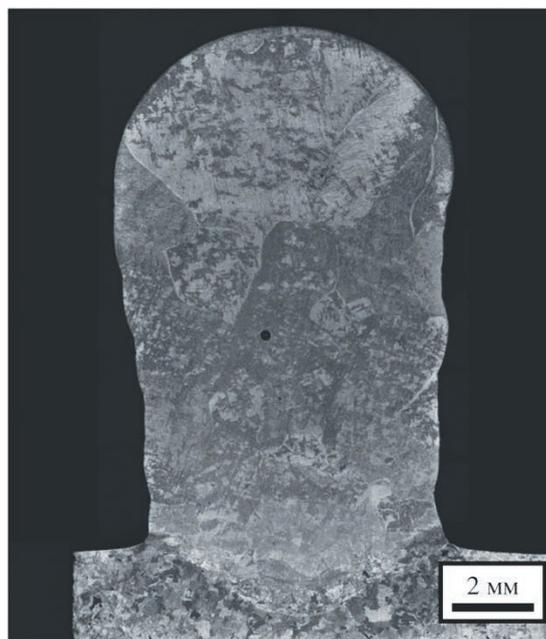

a

б

Рис. 5. Макроструктура образцов, полученных по режимам № 2 (*a*) и 6 (*б*)

Fig. 5. Macrostructure of samples obtained by modes № 2 (*a*) and 6 (*б*)

ченных по режимам № 2 и 6, структура неоднородная. Стоит отметить, что «стенки», полученные по режимам № 2 и 6, ниже и шире «стенок», полученных по режимам № 1 и 4, что объясняется значительным перегревом материала в процессе формирования «стенок».

Размер зерен в образцах, полученных по режимам № 2 и 6, значительно крупнее, чем размер зерен в образцах, полученных по режимам № 1 и 4.

Образцы «стенок», полученных по режимам № 5 и 8, характеризуются относительно ровны-

ми геометрическими размерами по сравнению со «стенками», полученными по режимам № 1, 2, 4, 6. Макроструктура образцов, полученных по данным режимам, характеризуется крупной столбчатой структурой, представленной первичными зёрнами β -фазы. Размер зёрен в нижней части «стенки» существенно меньше, чем в верхней (рис. 6). Аналогично предыдущим режимам микроструктура образцов состоит из β -фазы и игольчатой мартенситной α -фазы.

Результаты механических испытаний представлены в табл. 3. Для каждого из режимов было испытано не менее четырех образцов, после чего было рассчитано среднее значение для сравнения механических характеристик. Режимы № 5 и 8 позволяют получить изделия из титанового сплава ВТ6 с наибольшими значениями предела текучести и предела прочности из всех использованных комбинаций параметров. Из табл. 3 видно, что для образцов, полученных по режимам № 5 и 8, среднее значение предела прочности составляет 742,59 и 735,9 МПа, предела текучести 618,27 и 569,10 МПа, относительного удлинения при разрыве 10,6 и 11,1 % соответственно. Такой результат достигается за счет использования наименьшего параметра тока электронного пучка (25 мА) и наименьшего параметра скорости наплавки (180 мм/мин),

но наибольшим значением коэффициента заполнения ($k = 1,2$). Аналогично для образцов, полученных по режиму №8, использование наибольших параметров тока электронного пучка (40 мА) и скорости наплавки (350 мм/мин) с наибольшим значением коэффициента заполнения ($k = 1,2$) приводит к высокому значению предела прочности. Для остальных режимов перегрев материала привел к значительному снижению механических характеристик. Так, предел прочности в таком случае не превышает 703,6 МПа, что намного ниже требуемых для исследуемого сплава ВТ6 характеристик. Так как во всех случаях структура материала представлена крупными столбчатыми зёрнами, определяющую роль в формировании механических свойств играет тип и размеры пластин α -фазы. Для выявления различий в тонкой микроструктуре необходимо провести более подробные структурные исследования, что будет являться целью будущих работ. При этом стоит отметить, что максимальные значения механических характеристик, полученные в данном эксперименте, ниже, чем значения, представленные в работе [19].

Температурное воздействие в процессе электронно-лучевого аддитивного производства также оказывает существенное влияние на химический состав образцов сплава ВТ6. Как показал

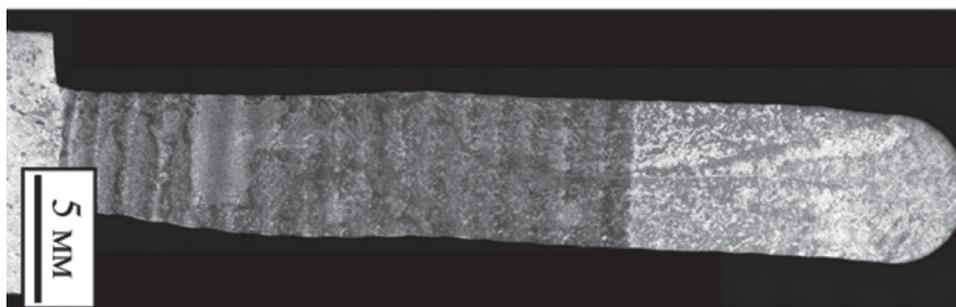
*a**б*

Рис. 6. Макроструктура образцов, полученных по режимам № 5 (а) и 8 (б)

Fig. 6. Macrostructure of samples obtained by modes № 5 (a) and 8 (b)

Таблица 3

Table 3

Средние значения механических характеристик образцов при испытаниях на статическое растяжение

Average values of mechanical properties of samples at static tensile tests

Номер режима	1	2	4	5	6	8
$\langle \sigma_B \rangle$, МПа	702,355	676,7	703,62	742,59	676,6	735,925
$\langle \sigma_{0,2} \rangle$, МПа	606,7	533,24	557,27	618,27	574,8	569,10
$\langle \delta \rangle$, %	11,85	16,375	8,25	10,625	10	11,075

спектральный анализ, образец № 2, демонстрирующий наименьшие механические свойства из всей выборки, существенно обеднен алюминием (всего 2 %), что не удовлетворяет марочному составу сплава. При этом образец № 8, показывающий предел прочности на растяжение порядка 736 МПа, содержит 5,1 % алюминия.

В связи с тем что полученные механические свойства не являлись удовлетворительными, на основании полученных экспериментальных данных с использованием РДМУ 109 был рассчитан оптимальный режим печати образцов из титанового сплава ВТ6 со следующими параметрами: ускоряющее напряжение – 30 кВ, ток пучка – 42 мА, скорость печати – 392 мм/мин, коэффициент заполнения – 1,05. Образцы, полученные по данному режиму, продемонстрировали средние значения предела прочности и предела текучести, равные 851 и 796 МПа соответственно. Относительное удлинение составило 10 %. Полученный результат соответствует значениям, которые получают другие исследователи [19], что свидетельствует о правильности рассчитанного режима. При этом структура такого типа образцов отличается от ранее полученных: она преимущественно представлена не крупными столбчатыми зернами, а более мелкими практически равноосными зернами первичной β -фазы (рис. 7). На изображениях можно рассмотреть небольшое количество пор сферической формы, однако они не оказали существенного влияния на разрушение образцов.

С помощью полученных экспериментальных данных удалось проследить закономерности влияния тепловых параметров процесса электронно-лучевого аддитивного производства на свойства изделий из титанового сплава ВТ6. В первую очередь стоит отметить, что объем подаваемого материала оказывает прямое воздействие на эффективность теплового режима, так как в случае чрезмерного количества подаваемой проволоки (или, наоборот, недостаточного количества) требуется корректировка режимов

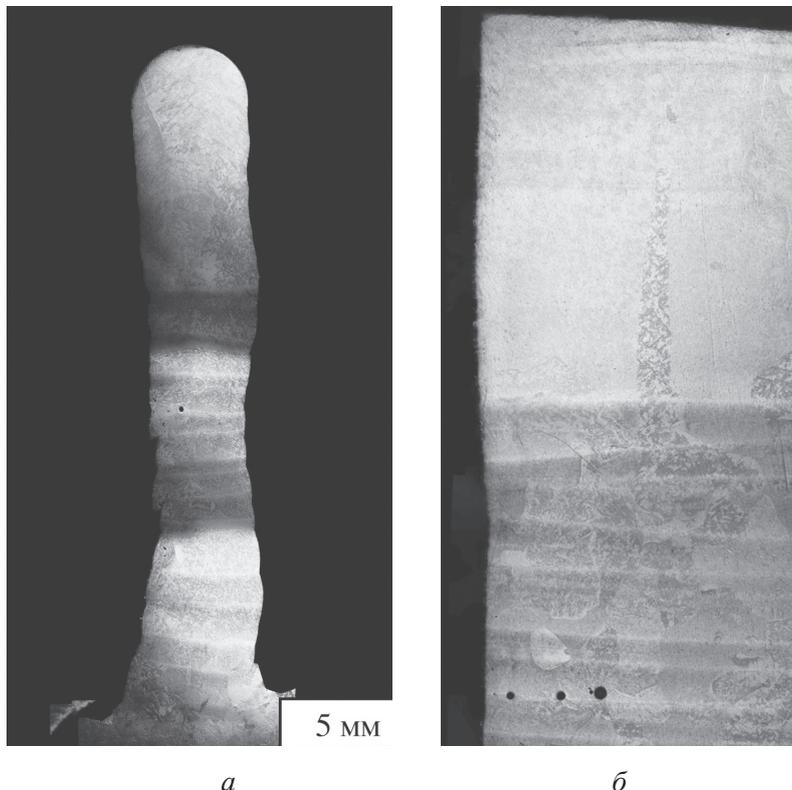


Рис. 7. Макроструктура образца, полученного по дополнительному режиму, в поперечном (а) и продольном (б) сечении

Fig. 7. Macrostructure of sample obtained by additional mode in transverse (a) and longitudinal (b) sections

для обеспечения оптимального плавления материала и формирования слоя.

Кроме того, определяющим фактором в процессе формирования структуры и свойств является скорость процесса печати, которая напрямую связана со скоростью кристаллизации материала. Результаты эксперимента показывают, что при близкой мощности пучка (1200 Вт в режиме №8 и 1260 Вт в дополнительном режиме) увеличение скорости печати на 12 % приводит к увеличению предела прочности материала на 16 % и предела текучести на 40 % при сохранении пластичности. Это позволяет сделать вывод, что в первую очередь при выборе режимов печати титанового сплава ВТ6 необходимо обеспечить высокую скорость кристаллизации материала, а подбор параметров электронного пучка осуществлять таким образом, чтобы при заданной скорости печати электронный луч стабильно формировал ванну расплава и обеспечивал расплавление заданного объема подаваемого материала.

Выводы

Проведенные исследования позволили получить необходимые сведения о влиянии тепловых параметров процесса проволочного электронно-лучевого аддитивного производства на процесс формирования изделий из титанового сплава ВТ6. Анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы.

Ряд режимов, характеризующихся тепловложениями на уровне 400 Дж/мм, приводит к нарушениям в процессе печати, обусловленным сильным перегревом материала. В результате это приводит к отклонению геометрических размеров образцов и ухудшению их механических характеристик. В то же время низкий уровень погонной энергии (128,5 Дж/мм) не позволяет сформировать изделие, так как не обеспечивает расплавление проволоки и создание ванны расплава.

Определяющим фактором в процессе формирования структуры и свойств изделий из титанового сплава ВТ6 является линейная скорость печати, напрямую связанная со скоростью кристаллизации. Так, при схожих параметрах электронного пучка увеличение скорости печати на 12 % позволяет повысить предел прочности

на 16 %, а предел текучести на 40 % при сохранении пластичности материала.

Параметры электронного пучка в данном случае играют второстепенную роль, так как должны обеспечивать стабильный процесс формирования слоев материала за счет оптимального расплавления заданного объема подаваемой проволоки при высокой скорости печати.

Список литературы

1. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges / T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
2. 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.
3. Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions / T. DebRoy, T. Mukherjee, J.O. Milewski, J.W. Elmer, B. Ribic, J.J. Blecher, W. Zhang // *Nature Materials*. – 2019. – Vol. 18, iss. 10. – P. 1026–1032. – DOI: 10.1038/s41563-019-0408-2.
4. Additive manufacturing for aerospace flight applications / A.A. Shapiro, J.P. Borgonia, Q.N. Chen, R.P. Dillon, B. McEnerney, R. Polit-Casillas, L. Soloway // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 2016. – Vol. 53, iss. 5. – P. 952–959. – DOI: 10.2514/1.A33544.
5. Structural heredity of the aluminum alloy obtained by the additive method and modified under severe thermomechanical action on its final structure and properties / T.A. Kalashnikova, A.V. Chumaevskii, V.E. Rubtsov, K.N. Kalashnikov, E.A. Kolubaev, A.A. Eliseev // *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol. 62, iss. 9. – P. 1565–1572. – DOI: 10.1007/s11182-020-01877-z.
6. Mower T.M., Long M.J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 651. – P. 198–213. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.10.068.
7. Processing of Al-Sc aluminum alloy using SLM technology / D. Koutny, D. Skulina, L. Pantělejev, D. Paloušek, B. Lenczowski, F. Palm, A. Nick // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 74. – P. 44–48. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.027.
8. Cordova L., Campos M., Tinga T. Revealing the effects of powder reuse for selective laser melting

by powder characterization // JOM. – 2019. – Vol. 71, iss. 3. – P. 1062–1072. – DOI: 10.1007/s11837-018-3305-2.

9. 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.

10. The features of structure formation in chromium-nickel steel manufactured by a wire-feed electron beam additive process / A.V. Kolubaev, S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, Y.A. Denisova, E.A. Kolubaev, A.I. Potekaev // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, iss. 8. – P. 1491–1498. – DOI: 10.1007/s11182-018-1561-9.

11. *Basak A., Das S.* Microstructure of nickel-base superalloy MAR-M247 additively manufactured through scanning laser epitaxy (SLE) // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 705. – P. 806–816. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.02.013.

12. *Ramakrishnan A., Dinda G.P.* Direct laser metal deposition of Inconel 738 // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 740–741. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.10.020.

13. *Brandl E., Schoberth A., Leyens C.* Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM) // Materials Science & Engineering: A. – 2012. – Vol. 532 (Complete). – P. 295–307. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.095.

14. Thermal and microstructural analysis of laser-based directed energy deposition for Ti-6Al-4V and Inconel 625 deposits / F. Lia, J.Z. Park, J.S. Keist, S. Joshi, R.P. Martukanitz // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 717. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.01.060.

15. *Gockel J., Beuth J., Taminger K.* Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V // Additive Manufacturing. – 2014. – Vol. 1–4. – P. 119–126. – DOI: 10.1016/j.addma.2014.09.004.

16. Influence of successive thermal cycling on microstructure evolution of EBM-manufactured alloy 718 in track-by-track and layer-by-layer design / P. Karimi, E. Sadeghi, P. Åkerfeldt, J. Ålgårdh, J. Andersson // Materials & Design. – 2018. – Vol. 160. – P. 427–441. – DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.038.

17. Mechanical behavior of differently oriented electron beam melting Ti-6Al-4V components using digital image correlation / E. Arrieta, M. Haque, J. Mireles, C. Stewart, C. Carrasco, R.B. Wicker // Journal of Engineering Materials and Technology. – 2018. – Vol. 141, iss. 1. – DOI: 10.1115/1.4040553.

18. Grain morphology evolution and texture characterization of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V / J. Wang, X. Lin, J. Wang, H. Yang, Y. Zhou, C. Wang, Q. Li, W. Huang // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 768. – P. 97–113. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.235.

19. Predicting tensile properties of Ti-6Al-4V produced via directed energy deposition / B.J. Hayes, B.W. Martin, B. Welk, S.J. Kuhr, T.K. Ales, D.A. Brice, I. Ghamarian, A.H. Baker, C.V. Haden, D.G. Harlow, H.L. Fraser, P.C. Collins // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 133. – P. 120–133. – DOI: 10.1016/j.actamat.2017.05.025.

20. The effect of wire feed geometry on electron beam freeform 3D printing of complex-shaped samples from Ti-6Al-4V alloy / K.N. Kalashnikov, V.E. Rubtsov, N.L. Savchenko, T.A. Kalashnikova, K.S. Osipovich, A.A. Eliseev, A.V. Chumaevskii // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105, iss. 7–8. – P. 3147–3156. – DOI: 10.1007/s00170-019-04589-y.

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



Assessment of the Heat Parameters Influence on the Process of Electron-Beam Printing of Titanium Alloy Ti64

Kirill Kalashnikov^{a,}, Denis Gurianov^b, Anna Zykova^c, Sergey Fortuna^d*

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

^a  <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>,  kkn@ispms.tsc.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0725-1219>,  desa-93@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>,  zykovaap@mail.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0002-2749-8094>,  s_fortuna@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 02 March 2020

Revised: 30 March 2020

Accepted: 14 April 2020

Available online: 15 June 2020

Keywords:

Additive manufacturing

Electron beam

Titanium alloy

Titanium wire

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. III.23.2.11

ABSTRACT

Introduction. At present, mainly conventional manufacturing methods, including isothermal forging/forming of hemispheres from titanium alloy workpieces with subsequent welding, are used to create essential components made of titanium alloys, such as high-pressure balloons for rocket engines. These methods are mainly complex multi-stage processes, and therefore the production of titanium balloons can take a very long time and entail high material costs. The technology of wire-feed electron-beam additive manufacturing considered in this work has become proven in the worldwide scientific and industrial community as a technology that allows increasing the productivity of the manufacturing process of various metal components, as well as reducing material costs by minimizing mechanical treatments. However, despite a large number of advantages of this method, technological features of the process, including geometrical parameters of the printed part, such as shape and height of the structure, the angle of the wall inclination from the printing plane, and others, have a significant impact on the formed structure. This is due to the fact that the heat process parameters for different configurations of the printed product will have a different impact on the formation of the structure. In this regard, **the purpose of the work** is to analyze the influence of heat parameters on the process of printing products from titanium alloy Ti64 using the electron-beam additive manufacturing method to identify regularities of structure formation and material properties at different process parameters. **Results and discussion.** The conducted researches have shown, that at various combinations of electron-beam 3D-printing process parameters, there is an insignificant change of macrostructure of the obtained Ti64 samples. However, due to different heat inputs and solidification rates, there are differences in microstructure and, therefore, in mechanical properties. The values of ultimate tensile strength and yield strength for obtained samples vary from 851 MPa and 796 MPa to 676 MPa and 574 MPa, respectively.

For citation: Kalashnikov K.N., Gurianov D.A., Zykova A.P., Fortuna S.V. Assessment of the heat parameters influence on the process of electron-beam printing of titanium alloy Ti64. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 41–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-41-52. (In Russian).

References

1. Ngo T.D., Kashai A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 143, pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
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, vol. 92, pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
3. DebRoy T., Mukherjee T., Milewski J.O., Elmer J.W., Ribic B., Blecher J.J., Zhang W. Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions. *Nature Materials*, 2019, vol. 18, iss. 10, pp. 1026–1032. DOI: 10.1038/s41563-019-0408-2.

* Corresponding author

Kalashnikov Kirill N., Junior Staff Scientist

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

av. Akademicheskii 2/4,

634055, Tomsk, Russian Federation

Tel.: +7-913-883-69-62, e-mail: kkn@ispms.tsc.ru

4. Shapiro A.A., Borgonia J.P., Chen Q.N., Dillon R.P., McEnerney B., Polit-Casillas R., Soloway L. Additive manufacturing for aerospace flight applications. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2016, vol. 53, iss. 5, pp. 952–959. DOI: 10.2514/1.A33544.
5. Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Rubtsov V.E., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Eliseev A.A. Structural heredity of the aluminum alloy obtained by the additive method and modified under severe thermomechanical action on its final structure and properties. *Russian Physics Journal*, 2020, vol. 62, iss. 9, pp. 1565–1572. DOI: 10.1007/s11182-020-01877-z.
6. Mower T.M., Long M.J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 651, pp. 198–213. DOI: 10.1016/j.msea.2015.10.068.
7. Koutny D., Skulina D., Pantělejev L., Paloušek D., Lenczowski B., Palm F., Nick A. Processing of Al-Sc aluminum alloy using SLM technology. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 74, pp. 44–48. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.027.
8. Cordova L., Campos M., Tinga T. Revealing the effects of powder reuse for selective laser melting by powder characterization. *JOM*, 2019, vol. 71, iss. 3, pp. 1062–1072. DOI: 10.1007/s11837-018-3305-2.
9. 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.
10. Kolubaev A.V., Tarasov S.Y., Filippov A.V., Denisova Y.A., Kolubaev E.A., Potekaev A.I. The features of structure formation in chromium-nickel steel manufactured by a wire-feed electron beam additive process. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 61, iss. 8, pp. 1491–1498. DOI: 10.1007/s11182-018-1561-9.
11. Basak A., Das S. Microstructure of nickel-base superalloy MAR-M247 additively manufactured through scanning laser epitaxy (SLE). *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 705, pp. 806–816. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.02.013.
12. Ramakrishnan A., Dinda G.P. Direct laser metal deposition of Inconel 738. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 740–741, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.msea.2018.10.020.
13. Brandl E., Schoberth A., Leyens C. Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM). *Materials Science & Engineering: A*, 2012, vol. 532 (Complete), pp. 295–307. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.095.
14. Lia F., Park J.Z., Keist J.S., Joshi S., Martukanitz R.P. Thermal and microstructural analysis of laser-based directed energy deposition for Ti-6Al-4V and Inconel 625 deposits. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 717, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.msea.2018.01.060.
15. Gockel J., Beuth J., Taminger K. Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 2014, vol. 1–4, pp. 119–126. DOI: 10.1016/j.addma.2014.09.004.
16. Karimi P., Sadeghi E., Åkerfeldt P., Ålgårdh J., Andersson J. Influence of successive thermal cycling on microstructure evolution of EBM-manufactured alloy 718 in track-by-track and layer-by-layer design. *Materials & Design*, 2018, vol. 160, pp. 427–441. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.038.
17. Arrieta E., Haque M., Mireles J., Stewart C., Carrasco C., Wicker R.B. Mechanical behavior of differently oriented electron beam melting Ti-6Al-4V components using digital image correlation. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2018, vol. 141, iss. 1. DOI: 10.1115/1.4040553.
18. Wang J., Lin X., Wang J., Yang H., Zhou Y., Wang C., Li Q., Huang W. Grain morphology evolution and texture characterization of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 768, pp. 97–113. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.235.
19. Hayes B.J., Martin B.W., Welk B., Kuhr S.J., Ales T.K., Brice D.A., Ghamarian I., Baker A.H., Haden C.V., Harlow D.G., Fraser H.L., Collins P.C. Predicting tensile properties of Ti-6Al-4V produced via directed energy deposition. *Acta Materialia*, 2017, vol. 133, pp. 120–133. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.05.025.
20. Kalashnikov K.N., Rubtsov V.E., Savchenko N.L., Kalashnikova T.A., Osipovich K.S., Eliseev A.A., Chumaevskii A.V. The effect of wire feed geometry on electron beam freeform 3D printing of complex-shaped samples from Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105, iss. 7–8, pp. 3147–3156. DOI: 10.1007/s00170-019-04589-y.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.