

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Повышение стабильности электронно-лучевого аддитивного формообразования тонкостенных изделий из титановых сплавов / А.В. Гуденко, А.П. Слива, Д.В. Шишкин, Г.С. Рагозин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 3 – С. 80–91. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.10

Please cite this article in English as:

Gudenko A.V., Sliva A.P., Shishkin D.V., Ragozin G.S. Increasing the stability of electron beam additive manufacturing of titanium thin-walled products. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 3, pp. 80-91. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.10

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 24, № 3, 2022**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.10

УДК 621.791.92

**А.В. Гуденко, А.П. Слива, Д.В. Шишкин, Г.С. Рагозин**

Московский энергетический институт, Москва, Российская Федерация

**ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО  
АДДИТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Введение технологических разверток способно влиять на гидродинамические процессы в сварочной ванне, а также перераспределять плотность мощности в зоне обработки и температуру в жидкой ванне. Подобное влияние может быть ключевым для измельчения структуры и повышения стабильности электронно-лучевого аддитивного формирования (ЭЛАФ).

В работе рассмотрено влияние развертки в форме «зигзаг» на стабильность электронно-лучевого аддитивного формообразования и на структуру образцов в виде вертикальных стенок толщиной в один валик. Влияние на структуру оценивалось по ширине и наклону первичных  $\beta$ -зерен, в том числе показано влияние производительности процесса ЭЛАФ на стабильность формирования и структуру.

Показано, что применение низкочастотных разверток в форме «зигзаг» при продольной амплитуде 1,8 и 2,4 мм на частотах 5 Гц позволяют избавиться от дефекта в виде «горба» в начале валиков. Механизм повышения стабильности связан с возникновением колебаний температуры и, следовательно, градиента поверхностного натяжения на поверхности жидкой ванны. Кроме того, усиливается влияние давления отдачи паров, которое также приводит к повышению стабильности процесса.

Использование развертки позволило стабилизировать ширину столбчатых  $\beta$ -зерен. При развертке из-за непрерывных колебаний температуры постоянно изменяется направление градиента температуры, которое приводит к подавлению одного конкретного направления преимущественного роста, делая рост кристаллов более конкурентным. Помимо этого, частота 5 Гц позволяла изменить наклон дендритов в сравнении с режимами с частотой 10 Гц и без развертки, что свидетельствует о влиянии частоты развертки на форму жидкой ванны.

**Ключевые слова:** электронный луч, аддитивные технологии, электронно-лучевая наплавка, проволока, титановые сплавы, развертка, определение режима, скорость наплавки, частота развертки, амплитуда развертки, стабильность наплавки, качество формирования.

A.V. Gudenko, A.P. Sliva, D.V. Shishkin, G.S. Ragozin

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russian Federation

## INCREASING THE STABILITY OF ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING OF TITANIUM THIN-WALLED PRODUCTS

The application of the technological oscillation can affect the weld pool hydrodynamic processes, as well as redistribute the power density in the processing zone and the temperature in the liquid pool. Such an influence may be key for the grain refinement and increasing the stability of electron beam freeform manufacturing (EBAM).

The paper considers the effect of the zigzag oscillation on the stability of electron beam additive manufacturing and on the structure of samples in the form of vertical walls with a thickness of one bead. The effect on the structure was assessed by the width and slope of the primary  $\beta$ -grains. In particular, the influence of the productivity of the EBAM process on the stability of formation and structure is shown.

It is shown that the use of the low-frequency oscillations in the form of a "zigzag" with a longitudinal amplitude of 1.8 and 2.4 mm at frequencies of 5 Hz makes it possible to get rid of the defect in the form of a "hump" at the beginning of each layer. The mechanism of increasing stability is associated with the occurrence of temperature fluctuations and, consequently, the gradient of surface tension on the surface of the liquid pool. In addition, the influence of the vapor recoil pressure increases, which also leads to an increase in the stability of the process.

The use of the oscillation allowed to stabilize the width of the columnar  $\beta$ -grains. Using the oscillation, the direction of the temperature gradient constantly changes due to continuous temperature fluctuations, which leads to the suppression of one particular direction of preferential growth, making the growth of crystals more competitive. In addition, the frequency of 5 Hz made it possible to change the slope of the dendrites in comparison with modes with a frequency of 10 Hz and without the oscillation, which indicates the influence of the oscillation frequency on the shape of the liquid pool.

**Keywords:** electron beam, additive manufacturing, electron beam weld deposition, wire, titanium alloys, oscillation, mode determination, deposition rate, oscillation frequency, oscillation amplitude, deposition stability, manufacturing quality.

### Введение

Для достижения стабильности формирования и свойств изделий необходимо определить оптимальные технологические параметры режима электронно-лучевого аддитивного формообразования (ЭЛАФ). Параметры режима ЭЛАФ удобно разделить на две категории – основные и дополнительные. К основным параметрам относятся энергетические параметры электронного луча – ускоряющее напряжение и ток луча, ток фокусировки, а также скорость наплавки и скорость подачи присадочной проволоки. К дополнительным можно отнести остальные параметры, среди которых тип, форма и параметры развертки в наибольшей степени влияют на формирование валиков.

Подходы к выбору основных параметров на сегодняшний момент уже достаточно хорошо изложены, и изучено их влияние на формирование слоев металла [1; 2]. Влияние развертки луча на формирование слоев, изменение структуры и свойств металлов исследовано недостаточно.

Тип первичной структура металла сварного шва или наплавленного валика определяется градиентом температуры на фронте кристаллизации, скоростью кристаллизации, а также концентрационным переохлаждением [3; 4]. Температурный градиент и скорость кристаллизации могут регулироваться изменением не только основных параметров процесса [3], но и за счет перераспределения тепловых потоков на поверхности ванны вследствие введения развертки электронного луча.

В основе большинства методов измельчения структуры при сварке и наплавке лежит получение в хвостовой части ванны готовых центров кри-

сталлизации, которые начинают расти в объеме жидкой ванны, останавливая тем самым рост дендритов на фронте кристаллизации [4]. К наиболее распространенным методам увеличения количества центров кристаллизации относятся: введение тугоплавких частиц [5] и фрагментация дендритов и оплавленных зерен за счет введения возмущений в жидкой ванне, таких как высокочастотные ультразвуковые колебания [6], электромагнитное перемешивание [7], модуляция тока [8, 9], а также применение развертки [10–14].

Развертка является эффективным технологическим инструментом и представляет собой циклическое движение источника теплоты, например электронного или лазерного луча, вдоль заданной траектории с заданной частотой [15]. Широкое применение развертка нашла при электронно-лучевой [16–21] и лазерной сварке [22–26]. Основной целью применения разверток является изменение геометрии сварного шва, подавление корневых дефектов и пор. Применение развертки помимо этого позволяет управлять структурой металла, в частности осуществлять переход от дендритных кристаллов к равноосным [10–14; 17; 19]. Также показана возможность влияния на геометрию наплаваемых слоев при дуговом аддитивном формообразовании [27] и структуру при порошковой наплавке [29].

Для регулирования формы слоев и структуры при электронно-лучевом аддитивном формообразовании развертка является удобным инструментом, поскольку не требует дополнительного оборудования – отклоняющая система установлена на всех современных сварочных электронных пушках. С точки зрения ЭЛАФ наиболее перспектив-

ными для управления формой слоев и их структуры выглядят «динамические» низкочастотные развертки, поскольку они активно влияют на гидродинамические процессы в жидкой ванне и позволяют создавать подъемную силу, приводящую к изменению формы сварных швов и наплавляемых валиков [30–33].

**Целью работы** является исследование влияния развертки электронного луча на стабильность формирования и структуру стенок толщиной в один валик из титанового сплава СПТ-2 при электронно-лучевом аддитивном формообразовании.

### 1. Методика наплавки

Электронно-лучевое аддитивное формирование образцов в виде высоких многослойных стенок толщиной в один валик проводилось на сварочной электронно-лучевой установке с энергоблоком ЭЛА-40И (АО НИТИ «Прогресс») с ускоряющим напряжением 60 кВ, оснащенной системой числового программного управления параметрами энергоблока, приводов и механизмом подачи проволоки.

В качестве сырьевого материала использовалась проволока из титанового сплава СПТ-2 диаметром 1,2 мм. Подложка была изготовлена сплав ВТ6ч в виде плиты толщиной 12 мм. Химический состав сплавов указан в табл. 1.

В работе было изготовлено 8 образцов. Режимы ЭЛАФ указаны в табл. 2. В образцах № 1–6 варьируемыми параметрами являлись продольная амплитуда  $A_x$  и частота развертки  $f$ . Для оценки влияния кратного увеличения производительности процесса формообразования при постоянной погонной энергии на стабильность формирования и структуру металла был изготовлен образец № 7. При этом режиме основные параметры – ток луча, скорость подачи проволоки и скорость наплавки – были в 2 раза больше в сравнении с № 1–6. Образцы № 1–7 выполнялись с разверткой в форме «зигзаг» (рис. 1, а), при которой основное движение электронного луча вдоль развертки направлено в противоположную сторону относительно направления наплавки (рис. 2). Поперечная амплитуда развертки  $A_y$  была одинаковой во всех экспериментах и равнялась толщине проволоки – 1,2 мм. В процессе движения вдоль траектории развертки электронный пучок совершает равномерное движение из точки 1 в точку 2 (см. рис. 1, а), после чего мгновенно возвращается в точку 1. Циклограмма движения электронного луча вдоль оси  $Ox$  показана на рис. 1, б.

Влияние развертки на формирование стенок оценивалось сравнением со стенкой № 8, полученной без применения развертки.

Таблица 1

Химический состав сплавов ВТ6 и СПТ-2 согласно ГОСТ 19807-91 и ГОСТ 27265-87 соответственно

Параметр	Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	ост.
СПТ-2	< 0,15	< 0,05	< 0,1	2,5–3,5	< 0,04	89,36–92,7	3,5–4,5	1–2	< 0,12	< 0,3
ВТ6	< 0,6	< 0,1	< 0,1	3,5–5,3	< 0,05	86,45–90,9	5,3–6,8	< 0,3	< 0,2	< 0,3

Таблица 2

Основные параметры электронно-лучевого аддитивного формообразования

№ п/п	Ток луча $I$ , мА	Ток фокусировки $I_f$ , мА	Скорость подачи проволоки $w$ , м/мин	Скорость наплавки $V$ , мм/мин	Форма развертки	Продольная амплитуда $A_x$ , мм	Частота развертки $f$ , Гц
1	10	725	1,5	125	Зигзаг	1,2	5
2							10
3							5
4							10
5							5
6							10
7	20		3	250		1,2	10
8	10		1,5	125	–	–	–

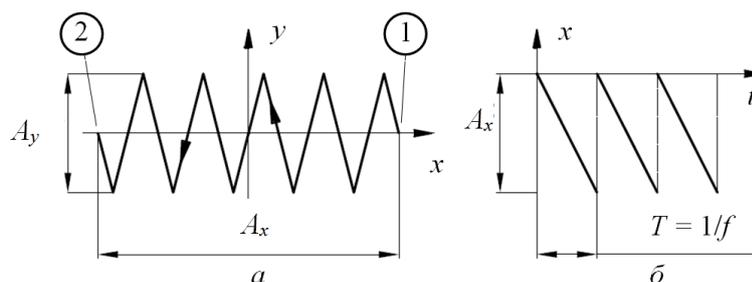


Рис. 1. Траектория движения луча (а) и циклограмма в осях  $xOt$  (б) развертки «зигзаг»

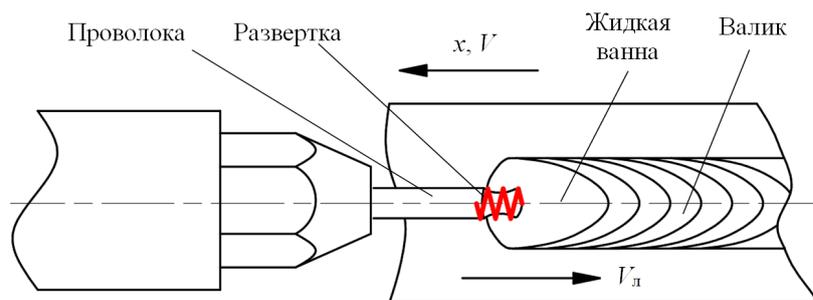


Рис. 2. Схема наплавки с использованием развертки в форме «зигзаг»:  $V_d$  – скорость движения вала вдоль продольного направления развертки,  $V$  – направление наплавки

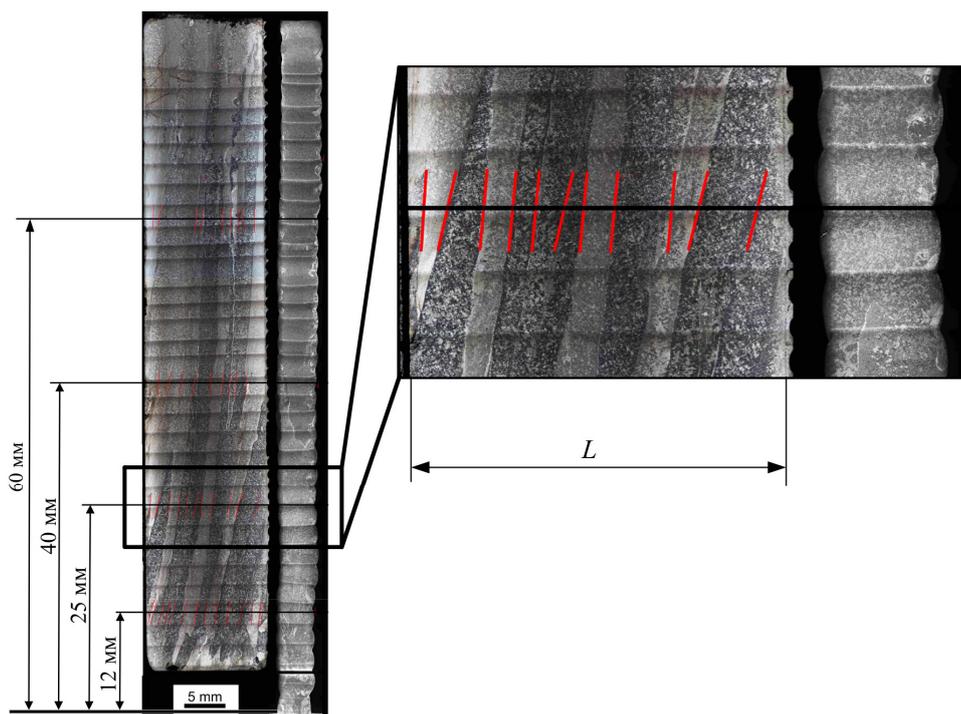


Рис. 3. Схема измерения средней ширины дендритов

После наплавки были изготовлены продольные шлифы полученных образцов, которые подвергались травлению в растворе с соотношением 1:2:5 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O [34] для выявления границ первичных  $\beta$ -зерен.

Влияние режимов на стабильность формирования и форму образцов оценивалось визуально в процессе наплавки, а также по форме готовых образцов.

Влияние частоты и амплитуды развертки на структуру металла оценивалось по продольным шлифам путем измерения средней ширины дендритов на различных расстояниях от подложки и наклона первичных  $\beta$ -зерен. Для измерения средней ширины дендритов  $B_{cp}$  проводились горизонтальные линии на расстояниях 12, 25, 40 и 60 мм от подложки длиной  $L$  (рис. 3). Фиксировалось количество пересечений этих линий с границами  $\beta$ -зерен (отмечены красными линиями), в результате чего получали количество зерен  $N$ , пересекаемых

заданным отрезком. Отсюда  $B_{cp}$  на каждом расстоянии от подложки равнялось:

$$B_{cp} = \frac{L}{N}. \quad (1)$$

## 2. Результаты

### 2.1. Формирование образцов

При проволоочном аддитивном формообразовании одним из основных дефектов формирования является «горб» в самом начале валика. Этот дефект образуется из-за неустановившегося теплового режима на начальном этапе наплавки каждого слоя. Из-за значительной разницы температур в жидкой ванне вдоль ее оси на начальном этапе наплавки проявляется эффект Марангони, обусловленный различием поверхностного натяжения жидкого металла, нагретого до различных температур, что и приводит к стягиванию металла в бо-

лее холодную область – в самое начало валика (рис. 4). В результате между горбом и основной частью валика возникает узкая часть – шейка. Наплавка по той же траектории поверх такого слоя приводит к накоплению дефекта и увеличению глубины занижения валика в области шейки. Из-за этого может произойти нарушение стабильности переноса металла и разрыв жидкой ванны. В итоге по мере дальнейшего роста образца возможна потеря стабильности наплавки на всей длине валика.

Полностью устранить дефект в виде «горба» в начале слоев при наплавке образцов позво-

лило введение развертки в форме «зигзаг» только при частотах развертки  $f = 5$  Гц и для амплитуд  $A_x = 1,8$  мм и  $A_x = 2,4$  мм (рис 4.). При частоте  $f = 10$  Гц для этих амплитуд наблюдается наличие шейки и «горба», но не в столь значительной степени, как в случае без применения развертки, при этом при  $A_x = 2,4$  мм дефект менее выражен по сравнению с  $A_x = 1,8$  мм. При амплитуде  $A_x = 1,2$  мм, как на частоте 5 Гц, так и 10 Гц, на образцах наблюдался дефект, сопоставимый с дефектом на образце, выполненном без развертки.

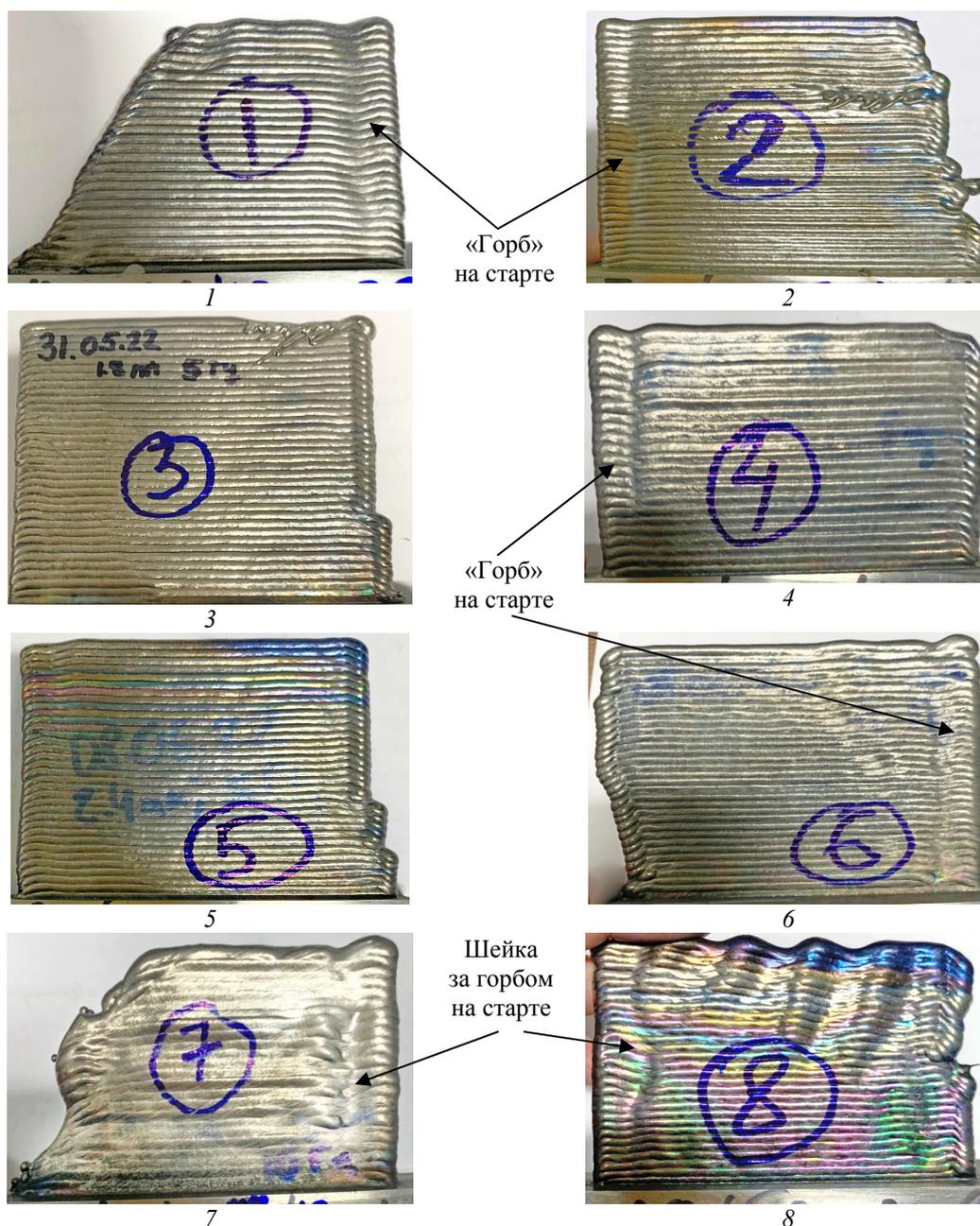


Рис. 4. Полученные образцы: 1 –  $A_x = 1,2$  мм и  $f = 5$  Гц; 2 –  $A_x = 1,2$  мм и  $f = 10$  Гц; 3 –  $A_x = 1,8$  мм и  $f = 5$  Гц; 4 –  $A_x = 1,8$  мм и  $f = 10$  Гц; 5 –  $A_x = 2,4$  мм и  $f = 5$  Гц; 6 –  $A_x = 2,4$  мм и  $f = 10$  Гц; 7 –  $V = 20$  мм/мин,  $A_x = 1,2$  мм и  $f = 5$  Гц; 8 – без развертки

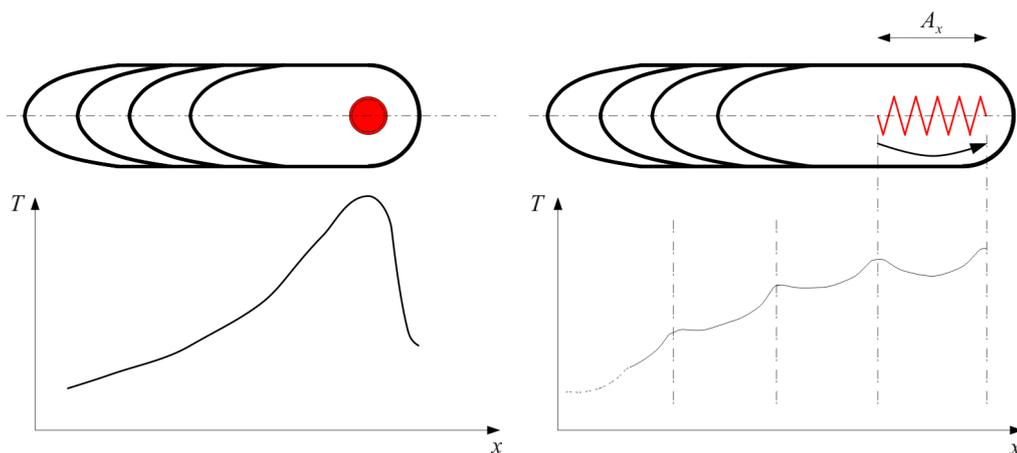


Рис. 5. Схема распределения температуры при ЭЛАФ статичным лучом и с использованием продольной развертки

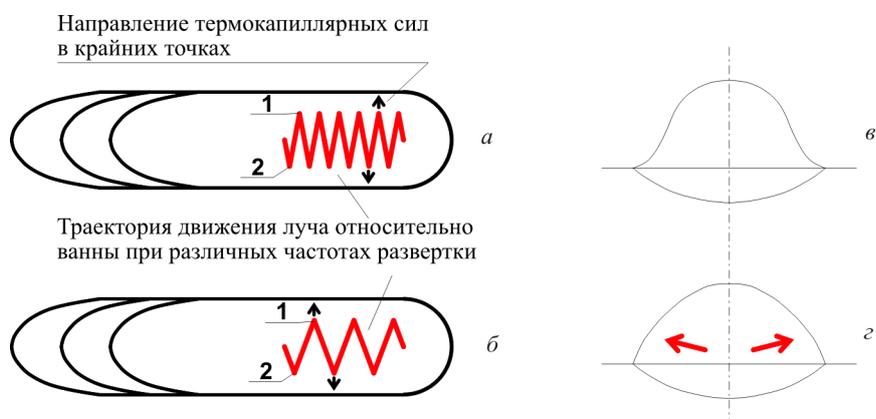


Рис. 6. Схема движения луча относительно сварочной ванны при высокой (а) и низкой (б) частотах развертки «зигзаг» и соответствующие им формы валиков (в, з)

Помимо нестабильности формирования слоя на начальном этапе, нестабильность усиливается по мере увеличения высоты формируемого образца: начиная с 15-го слоя, в процессе формирования образца № 8 без применения развертки возникают дефекты в виде «горбов» по всей длине слоя, и количество этих «горбов» увеличивалось по мере дальнейшего построения образца, то есть происходит постепенное необратимое нарушение стабильности процесса (рис. 4).

При использовании развертки «зигзаг» электронный луч совершает движение как в продольном направлении, так и в поперечном с определенной частотой. Длина развертки в продольном направлении – амплитуда  $A_x$  – определяет локальный градиент температур в области действия пучка (рис. 5), и, следовательно, градиента поверхностного натяжения жидкого металла по длине сварочной ванны. Чем больше  $A_x$ , тем более равномерно распределяется температура вдоль оси ванны, что в результате приводит к уменьшению градиента поверхностного натяжения и подавляет эффект Марангони, который проявляется на начальном участке валиков в виде «горбов».

Уменьшение частоты применяемой продольной развертки приводит к неравномерному распределению температуры вдоль оси ванны, создавая чередуемые условно холодные и горячие участки в жидком металле, что в том числе способствует снижению градиента температуры вдоль ванны (см. рис. 5).

При поперечном движении электронного луча относительно сварочной ванны непрерывно меняется направление вектора градиента температуры и термокапиллярной силы. Их наибольшее значение будет в крайних точках траектории – точках 1 и 2 на рис. 6, поскольку в момент, когда электронный пучок находится к крайней точке, расстояние до края валика наименьшее, следовательно, градиенты температуры и поверхностного натяжения на этом участке наиболее велики. При этом, чем меньше частота развертки, тем слабее прогреваются периферийные участки ванны, что дополнительно способствует увеличению термокапиллярных сил и переносу металла к периферии валика, что приводит к изменению формы валика – на краях валик становится более выпуклым, но в том числе более низким (рис. 6, в, з).

Таким образом, можно говорить, что при низких частотах развертки возникают термикапиллярные силы, обусловленные переменными градиентами температуры и поверхностного натяжения металла в сварочной ванне, не только в продольном направлении, но еще и в поперечном, которые непрерывно изменяются по направлению. Сложив векторы продольной и поперечной составляющих термокапиллярной силы, можно прийти к выводу, что направление переноса металла непрерывно меняется, приводя к более равномерному распределению металла по поверхности подложки или предыдущего слоя.

Помимо термокапиллярных сил, на перенос металла в жидкой ванне существенное влияние оказывает давление отдачи паров. Чем ниже частота развертки, тем ниже скорость движения луча вдоль траектории развертки, но при этом выше давление отдачи паров. В момент, когда электронный луч моментально переходит из конечной точки развертки в начальную, металл начинает заполнять «кратер» в конечной точке, создаваемый за счет давления отдачи паров. В результате металл начинает двигаться к этому «кратеру», меняя тем самым направление своего движения, а также направление градиента температуры.

Скорость наплавки является важным фактором, влияющим на стабильность формирования слоев. При высокой скорости наплавки неизбежно увеличивается длина сварочной ванны. Для материалов с высоким поверхностным натяжением, одним из которых является титан и сплавы на его основе, это может служить причиной разрыва сварочной ванны, которое приводит к формированию дефекта в виде «горба» не только в начале, но и на всей длине валика. В результате подбор остальных параметров режима ЭЛАФ для получения стабильного формирования при высокой скорости наплавки является весьма трудоемким процессом.

Изготовить образец с двукратной производительностью и неизменной погонной энергией удалось только при введении развертки в форме «зигзаг» с  $A_x = 1,2$  мм и  $f = 10$  Гц (образец № 7, см. рис. 4, 7). При таком режиме наблюдается высокая чувствительность стабильности формирования к смещению по оси  $Oz$  при подъеме от слоя к слою. На такой скорости дефект в виде «горба» является наиболее заметным в сравнении со всеми образцами, выполненными на скорости наплавки  $V = 125$  мм/мин (см. рис. 4). Однако следует отметить, что на некоторых слоях наблюдается самопроизвольное «залечивание» провала в шейке после начального «горба».

Значительная нестабильность наплавки возникает при изготовлении образца без использования развертки (образец № 8, см. рис. 4, 8). Нестабильность при наплавке без развертки возникает

вследствие небольшого размера источника теплоты в продольном направлении. При таких размерах электронный луч направлен целиком на проволоку, что приводит к перегреву металла проволоки при ее плавлении, в то время как непосредственно в подложку вкладывается меньше тепла, чем при использовании разверток. Из-за возникающих возмущений, например колебания конца проволоки, меняется установившееся распределение вводимого тепла в сторону перегрева подложки. В результате на поверхности валика возникает градиент тепла и поверхностного натяжения, приводящий к образованию «горбов» на любом этапе наплавки. В отличие от наплавки с использованием развертки, без ее использования дефект в виде «горба» только накапливается без возможности самостоятельного «залечивания», что наблюдается на рис. 4, 7.

## 2. Влияние развертки на структуру металла

Структура наплавленных образцов в продольном сечении представляет собой вытянутые первичные  $\beta$ -зерна (рис. 7). На начальном этапе на ширину дендритов существенное влияние оказывает структура основного металла, именно поэтому вблизи подложки ширина дендритов наименьшая.

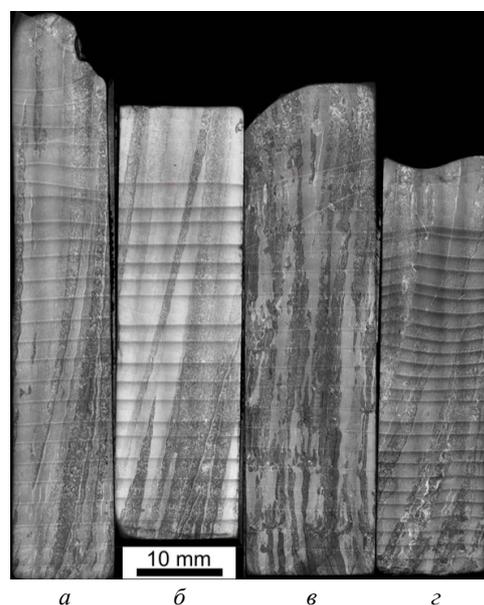


Рис. 7. Продольный макрошлиф образцов: а – № 1 –  $A_x = 1,2$  мм и  $f = 5$  Гц; б – № 4 –  $A_x = 1,8$  мм и  $f = 10$  Гц; в – № 7 –  $V = 250$  мм/мин,  $A_x = 1,2$  мм и  $f = 10$  Гц; г – № 8 без развертки

При использовании развертки электронного луча средняя ширина дендритов по мере удаления от подложки сначала увеличивается, после чего стабилизируется, в то время как без использования развертки наблюдается укрупнение дендритов по шири-

не (рис. 8). Объяснить подобное поведение возможно за счет температурных колебаний по длине жидкой ванны при использовании развертки формы «зигзаг» либо аналогичной развертки динамического типа (см. рис. 5). На некотором расстоянии от подложки начинает преобладать конкурирующий рост кристаллов над эпитаксиальным, зерна растут преимущественно в направлении теплоотвода перпендикулярно поверхности сварочной ванны. Зерна, растущие в отличном от этого направлении, перестают расти, поскольку их вытесняют другие кристаллы, растущие в предпочтительном направлении.

Наличие колебаний температуры как вдоль направления наплавки, так и поперек, и, следовательно, непрерывное изменение направления градиента температуры приводят к тому, что исключается одно доминирующее направление теплоотвода. Таким образом увеличивается вариативность направлений роста, повышается конкуренция за рост среди дендритов, а доминирующее направление роста размывается, в результате чего больше дендритов имеют возможность расти, а ширина дендритов при этом стабилизируется. При скорости наплавки  $V = 125$  мм/мин (образцы № 1–6 и 8) при частоте  $f = 5$  Гц для всех амплитуд развертки

ширина дендритов оказалась ниже не только на начальном участке, но и по всей высоте образца в сравнении с частотой  $f = 10$  Гц (см. рис. 8). Эти результаты согласуются с предположением о том, что при более низких частотах развертки возникают более заметные температурные колебания вдоль и поперек направления наплавки, которые ограничивают рост поперечный рост дендритов первичных  $\beta$ -зерен.

Наплавка со скоростью  $V = 250$  мм/мин (образец № 7) привела к заметному измельчению дендритов по сравнению с остальными образцами, выполненными со скоростью  $V = 125$  мм/мин. Это объясняется тем, что размер зерен главным образом определяется скоростью охлаждения, которая тем выше, чем выше скорость наплавки при аналогичной вкладываемой тепловой энергии.

Другим достойным внимания фактом является наклон дендритов относительно подложки (табл. 3). Из таблицы видно, что при частоте  $f = 5$  Гц для всех амплитуд разверток угол наклона дендритов составляет  $5\text{--}6^\circ$ , в то время как при  $f = 10$  Гц и без использования развертки  $13\text{--}16^\circ$ . Этот факт может говорить о влиянии частоты развертки на форму изотермы кристаллизации.

Таблица 3

Угол наклона дендритов в образцах

№ п/п	Скорость наплавки $V$ , мм/мин	Форма развертки	Продольная амплитуда $A_x$ , мм	Частота развертки $f$ , Гц	Угол наклона дендритов, $^\circ$
1	125	Зигзаг	1,2	5	5
2				10	–
3			1,8	5	6,6
4				10	13,75
5			2,4	5	4,6
6				10	16
7	250	–	1,2	10	1
8	125	–	–	–	16,4

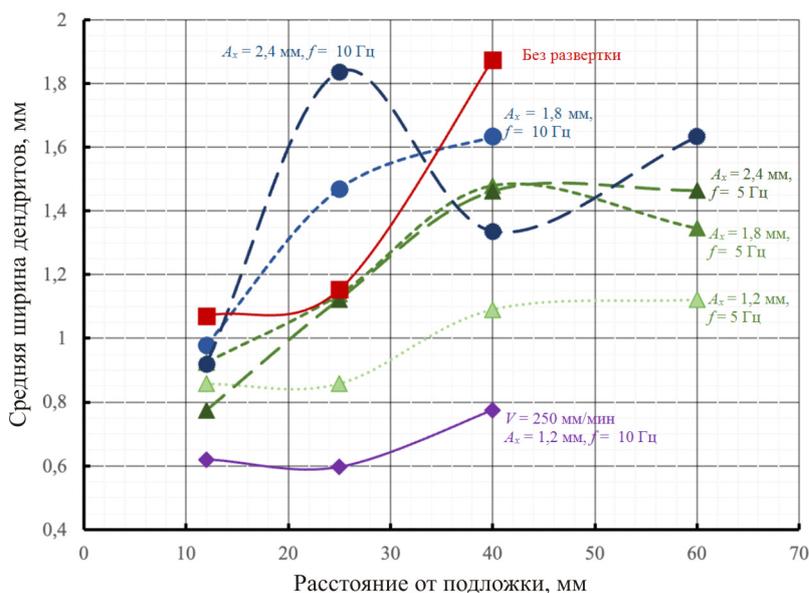


Рис. 8. Средняя ширина дендритов в продольном сечении образцов на различных расстояниях от подложки

По мере роста образца наклон дендритов несколько уменьшается, что связано с удлинением жидкой ванны из-за высокой температуры нижних слоев. В том числе из-за этого при скорости  $V = 250$  мм/мин дендриты растут практически вертикально, поскольку из-за высокой длины жидкой ванны при этой скорости нижняя поверхность ванны практически параллельна направлению наплавки.

### Заключение

Влияние параметров развертки в форме «зигзаг» на формирование и структуру первичных  $\beta$ -зерен было продемонстрировано в работе при электронно-лучевом аддитивном формообразовании, что позволяет сделать следующие выводы.

1. Применение развертки в форме «зигзаг» позволяет повысить стабильность формирования валиков и устранить дефект формирования в виде «горба» на начальном участке. Стабильное формирование валиков по всей длине стоя наблюдалось при частоте развертки 5 Гц с амплитудой 1,8 и 2,4 мм. В этих условиях происходит непрерывное изменение тепловых потоков в сварочной ванне как в продольном, так и в поперечном направлениях, вызываемое движением электронного луча при развертке, в результате чего термокапиллярная сила непрерывно меняет свое направление, что препятствует стягиванию металла в хвост сварочной ванны и формированию горба.

2. Введение низкочастотной развертки в форме «зигзаг» позволяет уменьшить и стабилизировать ширину дендритов первичной  $\beta$ -фазы по высоте формируемого образца. Наименьшая ширина дендритов и стабильность ширины по высоте наблюдаются при частоте развертки 5 Гц и амплитуде 1,2 мм. Колебания температуры, возникающие из-за введения развертки в форме «зигзаг», приводят к подавлению одного преимущественного направления роста в результате непрерывного изменения градиента теплоты. В таком случае повышается конкурентность роста кристаллов, вследствие чего больше дендритов способно к росту.

3. Наклон дендритов оказывается чувствительным к введению развертки и к ее частоте: на меньшей частоте – 5 Гц наклон дендритов меньше для более малой частоты наплавки, что свидетельствует о влиянии частоты развертки на форму сварочной ванны.

4. Применение разверток за счет повышения стабильности процесса способно расширить область допустимых режимов в сторону увеличения производительности

### Библиографический список

1. Wire-Based Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Using Electron Beam Technique / F. Pixner, F. Warchomicka,

P. Peter, A. Steuwer, M.H. Colliander, R. Pederson, N. Enzinger // *Materials*. – 2020. – Vol. 13 (3310). – P. 1–23.

2. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source // *Welding in the World*. – 2018. – Vol. 62. – P. 267–275.

3. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / В.М. Неровный [и др.]; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2016. – 702.

4. *Welding metallurgy* / Sindo Kou. – 2<sup>nd</sup> ed. p. cm. “A Wiley-Interscience publication”. – 2002. – 671 p.

5. Peng Jin, Yibo Liu, Qingjie Sun. Evolution of crystallographic orientation, columnar to equiaxed transformation and mechanical properties realized by adding TiCps in wire and arc additive manufacturing 2219 aluminum alloy // *Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 39 (101878). – P. 1–14.

6. The microstructure, phase composition and tensile properties of austenitic stainless steel in a wire-feed electron beam melting combined with ultrasonic vibration / Andrey Vorontsov, Sergey Astafurov, Evgeny Melnikov, Valentina Moskvina, Evgeny Kolubaev, Elena Astafurova // *Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 820 (141519). – P. 1–10.

7. Effect of Electromagnetic Stirring Frequency on Inconel625-High Strength Low Alloy Steel Functionally Graded Material Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing / J. Zhang, Di X., Li C. [et al.] // *J. of Materi Eng and Perform*. – 2022. – Vol. 31. – P. 1–11.

8. Grain Refinement of Freeform Fabricated Ti-6Al-4V Alloy Using Beam/Arc Modulation / S. Mitzner [et al.] // *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. – University of Texas at Austin, 2012. – P. 536–555.

9. Влияние частоты тока при импульсной послойной плазменной наплавке на структуру и свойства высоколегированной стали при аддитивном формировании изделий / А.Ю. Душина, Т.В. Ольшанская, С.Д. Неулыбин, Ю.Д. Щицын, Р.Г. Никулин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 20–26.

10. Optimization of the solidification conditions by means of beam oscillation during laser beam welding of aluminum / Christian Hagenlocher, Martin Sommer, Florian Fetzer, Rudolf Weber, Thomas Graf // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 160. – P. 1178–1185.

11. Effects of beam oscillation modes on microstructure and mechanical properties of laser welded 2060 Al-Li alloy joints / Xiaohui Zhou, Hongyun Zhao, Fuyun Liu, Biao Yang, Bingxiao Xu, Bo Chen, Caiwang Tan // *Optics & Laser Technology*. – 2021. – Vol. 144 (107389). – P. 1–11.

12. Effects of laser oscillating frequency on energy distribution, molten pool morphology and grain structure of AA6061/AA5182 aluminum alloys lap welding / Lin Chen, Chunming Wang, Gaoyang Mi, Xiong Zhang // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol 15. – P. 3133–3148.

13. Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy / Lei Wang, Ming Gao, Chen Zhang, Xiaoyan Zeng // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 108. – P. 707–717.

14. Melt flow and grain refining in laser oscillating welding of  $\beta$ -21S titanium alloy / Zhenglong Lei, Yuan Chen, Heng Zhou, Xuefeng Wang, Jingtao Liu, Peiyun Xia //

Optics & Laser Technology. – 2022. – Vol. 145 (107496). – P. 1–11.

15. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – 162 с.

16. Kar J., Roy S.K., Roy G.G. Influence of beam oscillation in electron beam welding of Ti-6Al-4V // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 94. – P. 4531–4541.

17. Kar J., Roy S.K., Roy G.G. Effect of Beam Oscillation on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316L Electron Beam Welds // Metallurgical and materials transactions A. – 2017. – Vol. 48. – P. 1759–1770.

18. Электронно-лучевая сварка технического титана и никеля / Е.В. Терентьев, А.П. Слива, А.Л. Гончаров [и др.] // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Материалы III междунар. конф., Москва, 12–15 ноября 2019 г. / под ред. В.К. Драгунова. – М.: Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»» (Издательство ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»»), 2020. – С. 307–324.

19. The effect of beam oscillations on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded steel joints / K. Komerla, S. Gach, T. Vossel [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 102. – P. 2919–2931.

20. Influence of Different Beam Oscillation Patterns in Electron Beam Welding of Niobium Sheets with Different Thickness / Tao Jia, Jiefeng Wu, Zhihong Liu, Jianguo Ma, Zhenfei Liu, Wuqingliang Peng // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 11. – P. 1–14.

21. Effect of beam oscillation on fatigue life of Ti-6Al-4V electron beam weldments / N. Kishore Babu, S. Ganesh Sundara Raman, C.V. Srinivasa Murthy, G. Madhusudhan Reddy // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Vol. 471. – P. 113–119.

22. Effect of S-curve laser power for power distribution control on laser oscillating welding of 5A06 aluminum alloy / Zhejun Tan, Bowen Pang, J.P. Oliveira, Long Chen, Xianzheng Bu, Zhimin Wang, Baoqiang Cong, Zhi Zeng // Optics & Laser Technology. – 2022. – Vol. 149. – P. 1–9.

23. Kangda Hao, Ming Gao. Effect of beam oscillating behavior on pore inhibition and microstructure evolution mechanisms of laser welded Q235 steel // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 11. – P. 1816–1827.

24. Sinusoidal oscillating laser welding of 7075 aluminum alloy: Hydrodynamics, porosity formation and optimization / Tongtong Liu, Zhongyan Mu, Renzhi Hu, Shengyong Pang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 140. – P. 346–358.

25. Suppressing porosity of a laser keyhole welded Al-6Mg alloy via beam oscillation / Chen Zhang, Yan Yu, Cong Chen, Xiaoyan Zeng, Ming Gao // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 278. – P. 1–7.

26. Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi / Florian Fetzer, Martin Sommer, Rudolf Weber, Jan-Philipp Weberpals, Thomas Graf // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Vol. 108. – P. 68–77.

27. Effect of Magnetic Arc Oscillation on the geometry of single-pass multi-layer walls and the process stability in wire and arc additive manufacturing / D.R. Corradi, A.Q. Bracarense, B. Wu, D. Cuiuri, Z. Pan, H. Li // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 283. – P. 1–15.

28. The Influence of Magnetic Arc Oscillation on the Deposition Width Variation along the Length of Multi-layer Single-Pass Walls Produced by Wire Arc Additive Manufacturing Process / D.R. Corradi, F.G. Coelho, M.G. Antonello, A.Q. Bracarense, A.R. Arias, T.P. Barbosa // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – Vol. 30. – P. 5278–5289.

29. Yelin Xia, Jianbo Lei, Hanning Chen. Effects of circular oscillating laser on microstructure and mechanical property of nickel-based superalloy by laser melting deposition // Optics & Laser Technology. – 2022. – Vol. 155. – P. 1–13.

30. Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition / V.K. Dragunov, M.V. Goryachkina, A.V. Gudenko, A.P. Sliva, A.V. Shcherbakov // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. – 2019. – Vol. 681 (012008). – P. 1–6.

31. Gudenko A.V., Sliva A.P. Influence of electron beam oscillation parameters on the formation of details by electron beam metal wire deposition method // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1109 (012037). – P. 1–10.

32. Слива А.П. Повышение качества сварных соединений при ЭЛС с осцилляцией электронного пучка сплавов алюминия со сквозным проплавлением // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: сборник материалов и докладов II междунар. конф. – М., 2017. – С. 506–520.

33. Гуденко А.В., Слива А.П., Шишкин Д.В. Влияние параметров технологических разверток на формирование валиков при электронно-лучевом аддитивном формообразовании // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 27–38. DOI 10.15593/2224-9877/2021.3.03

34. Z. Fan, H. Feng. Study on Selective Laser Melting and Heat Treatment of Ti-6Al-4V Alloy // Results in Physics. – 2018. – Vol. 10. – P. 660–664.

## References

1. Pixner F., Warchomicka F., Peter P., Steuerer A., Colliander M.H., Pederson R., Enzinger N. Wire-Based Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Using Electron Beam Technique. *Materials*, 2020, vol. 13 (3310), pp. 1–23.

2. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source. *Welding in the World*, 2018, vol. 62, pp. 267–275.

3. Nerovnyi V.M. et al. Teoriia svarochnykh protsessov: uchenik dlia vuzov [The theory of welding processes]. 2nd. Moscow: Izdatel'stvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2016, 702 p.

4. Sindo Kou. Welding metallurgy. 2nd. A WileyInterscience publication, 2002, 671 p.

5. Peng Jin, Yibo Liu, Qingjie Sun. Evolution of crystallographic orientation, columnar to equiaxed transfor-

mation and mechanical properties realized by adding TiCps in wire and arc additive manufacturing 2219 aluminum alloy. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 39 (101878), pp. 1–14.

6. Vorontsov A., Astafurov S., Melnikov E., Moskvina V., Kolubaev E., Astafurova E. The microstructure, phase composition and tensile properties of austenitic stainless steel in a wire-feed electron beam melting combined with ultrasonic vibration. *Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 820 (141519), pp. 1–10.

7. Zhang J., Di X., Li C. et al. Effect of Electromagnetic Stirring Frequency on Inconel625-High Strength Low Alloy Steel Functionally Graded Material Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. *Journal of Mater Eng and Perform*, 2022, vol. 31, pp. 1–11.

8. Mitzner S. et al. Grain Refinement of Freeform Fabricated Ti-6Al-4V Alloy Using Beam/Arc Modulation. *International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin*, 2012, pp. 536–555.

9. Dushina A.Iu., Ol'shanskaia T.V., Neulybin S.D., Shchitsyn Iu.D., Nikulin R.G. Vliianie chastoty toka pri impul'snoi posloinoi plazmennoi naplavke na strukturu i svoistva vysokolegiro-vannoï stali pri additivnom formirovanii izdelii [Influence of current frequency during pulsed layer-by-layer plasma surfacing on the structure and properties of high-alloyed steel during additive product formation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 20–26.

10. Hagenlocher Ch., Sommer M., Fetzer F., Weber R., Graf T. Optimization of the solidification conditions by means of beam oscillation during laser beam welding of aluminum. *Materials and Design*, 2018, vol. 160, pp. 1178–1185.

11. Zhou X., Zhao H., Liu F., Yang B., Xu B., Bo Chen, Tan C. Effects of beam oscillation modes on microstructure and mechanical properties of laser welded 2060 Al-Li alloy joints. *Optics and Laser Technology*, 2021, vol. 144 (107389), pp. 1–11.

12. Chen L., Wang C., Mi G., Zhang X. Effects of laser oscillating frequency on energy distribution, molten pool morphology and grain structure of AA6061/AA5182 aluminum alloys lap welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 3133–3148.

13. Wang L., Gao M., Zhang Ch., Zeng X. Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy. *Materials and Design*, 2016, vol. 108, pp. 707–717.

14. Lei Zh., Chen Yu., Zhou H., Wang X., Liu J., Xia P. Melt flow and grain refining in laser oscillating welding of  $\beta$ -21S titanium alloy. *Optics and Laser Technology*, 2022, vol. 145 (107496), pp. 1–11.

15. Zuev I.V. Obrabotka materialov kontsentrirovannymi potokami energii [Material treatment with concentrated energy flows]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 1998, 162 p.

16. Kar J., Roy S.K., Roy G.G. Influence of beam oscillation in electron beam welding of Ti-6AL-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 4531–4541.

17. Kar J., Roy S.K., Roy G.G. Effect of Beam Oscillation on Microstructure and Mechanical Properties of

AISI 316L Electron Beam Welds. *Metallurgical and materials transactions A*, 2017, vol. 48, pp. 1759–1770.

18. Terent'ev E.V., Sliva A.P., Goncharov A.L. et al. Elektronno-luchevaia svarka tekhnicheskogo titana i nikelia [Electron-beam welding of technical titanium and nickel]. *Elektronno-luchevaia svarka i smezhnye tekhnologii: Materialy III mezhdunarodnoi konferentsii*. Ed. V.K. Dragunova. Moscow: Izdatel'stvo federal'nogo gosudarstvennogo biudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniia vysshego professional'nogo obrazovaniia "Natsional'nyi issledovatel'skii universitet "MEI" (Izdatel'stvo FGBOU VPO "NIU "MEI"), 2020, pp. 307–324.

19. Komerla K., Gach S., Vossel T. et al. The effect of beam oscillations on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded steel joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102, pp. 2919–2931.

20. Tao Jia, Jiefeng Wu, Zhihong Liu, Jianguo Ma, Zhenfei Liu. Wuqingliang Peng Influence of Different Beam Oscillation Patterns in Electron Beam Welding of Niobium Sheets with Different Thickness. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 11, pp. 1–14.

21. Kishore Babu N., Ganesh Sundara Raman S., Srinivasa Murthy C.V., Madhusudhan Reddy G. Effect of beam oscillation on fatigue life of Ti-6Al-4V electron beam weldments. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 471, pp. 113–119.

22. Zhejun Tan, Bowen Pang, J.P. Oliveira, Long Chen, Xianzheng Bu, Zhimin Wang, Baoqiang Cong, Zhi Zeng. Effect of S-curve laser power for power distribution control on laser oscillating welding of 5A06 aluminum alloy. *Optics and Laser Technology*, 2022, vol. 149, pp. 1–9.

23. Kangda Hao, Ming Gao. Effect of beam oscillating behavior on pore inhibition and microstructure evolution mechanisms of laser welded Q235 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 11, pp. 1816–1827.

24. Tongtong Liu, Zhongyan Mu, Renzhi Hu, Shengyong Pang. Sinusoidal oscillating laser welding of 7075 aluminum alloy: Hydrodynamics, porosity formation and optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 140, pp. 346–358.

25. Chen Zhang, Yan Yu, Cong Chen, Xiaoyan Zeng, Ming Gao. Suppressing porosity of a laser keyhole welded Al-6Mg alloy via beam oscillation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 278, pp. 1–7.

26. Florian Fetzer, Martin Sommer, Rudolf Weber, Jan-Philipp Weberpals, Thomas Graf. Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 108, pp. 68–77.

27. Corradi D.R., Bracarense A.Q., Wu B., Cuiuri D., Pan Z., Li H. Effect of Magnetic Arc Oscillation on the geometry of single-pass multi-layer walls and the process stability in wire and arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 283, pp. 1–15.

28. Corradi D.R., Coelho F.G., Antonello M.G., Bracarense A.Q., Arias A.R., Barbosa T.P. The Influence of Magnetic Arc Oscillation on the Deposition Width Variation along the Length of Multi-layer Single-Pass Walls Produced by Wire Arc Additive Manufacturing Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, vol. 30, pp. 5278–5289.

29. Yelin Xia, Jianbo Lei, Hanning Chen. Effects of circular oscillating laser on microstructure and mechanical property of nickel-based superalloy by laser melting deposition. *Optics and Laser Technology*, 2022, vol. 155, pp. 1–13.

30. Dragunov V.K., Goryachkina M.V., Gudenko A.V., Sliva A.P., Shcherbakov A.V. Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019, vol. 681 (012008), pp. 1–6.

31. Gudenko A.V., Sliva A.P. Influence of electron beam oscillation parameters on the formation of details by electron beam metal wire deposition method. *Journal of Physics: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1109 (012037), pp. 1–10.

32. Sliva A.P. Povyshenie kachestva svarnykh soedinenii pri ELS s ostilliatsei elektronnoy puchki splavov aliuminiia so skvoznym proplavleniem [Improving the quality of welded joints with electron beam oscillation of aluminum alloys with through penetration]. *Elektronno-luchevaia svarka i smezhnye tekhnologii: sbornik materialov i dokladov II mezhdunar. konf.* Moscow, 2017, pp. 506–520.

33. Gudenko A.V., Sliva A.P., Shishkin D.V. Vlii-anie parametrov tekhnologicheskikh razvertok na formirovanie valikov pri elektronno-luchevom additivnom formoobrazovanii [Influence of the parameters of technological reamers on the formation of rolls during electron-beam additive shaping]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 27–38. DOI 10.15593/2224-9877/2021.3.03

34. Fan Z., Feng H. Study on Selective Laser Melting and Heat Treatment of Ti-6Al-4V Alloy. *Results in Physics*, 2018, vol. 10, pp. 660–664.

Поступила: 15.07.2022

Одобрена: 17.08.2022

Принята к публикации: 20.08.2022

### Об авторах

**Гуденко Александр Викторович** (Москва, Россия) – аспирант, ассистент кафедры «Технологии металлов» Национального исследовательского университета «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 17, e-mail: alexsguddy@gmail.com).

**Слива Андрей Петрович** (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии металлов» Национального исследовательского универ-

ситета «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 17, e-mail: slivap@mail.ru).

**Шишкин Дмитрий Владимирович** (Москва, Россия) – аспирант кафедры «Технологии металлов» Национального исследовательского университета «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 17, e-mail: mitshishkin@mail.ru).

**Рагозин Герман Сергеевич** (Москва, Россия) – аспирант кафедры «Технологии металлов» Национального исследовательского университета «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 17, e-mail: RagozinGS@mpei.ru).

### About the authors

**Alexander V. Gudenko** (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate, Assistant of Metal Technology Department, NRU “MPEI” (17, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: alexsguddy@gmail.com).

**Andrey P. Sliva** (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associated Professor of Metal Technology Department, NRU “MPEI” (17, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: slivap@mail.ru).

**Dmitry V. Shishkin** (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate, NRU “MPEI” (17, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: mitshishkin@mail.ru).

**German S. Ragozin** (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate, NRU “MPEI” (17, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: RagozinGS@mpei.ru).

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90174.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад всех авторов** равноценен.