

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

Gudenko A.V., Sliva A.P., Shishkin D.V. The influence of the technological oscillation parameters on the bead formation during wire-feed electron-beam additive manufacturing. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 27–38. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.03

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 3, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.03
УДК 621.791.92

А.В. Гуденко, А.П. Слива, Д.В. Шишкин

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
Москва, Россия

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗВЕРТОК НА ФОРМИРОВАНИЕ
ВАЛИКОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ**

Электронно-лучевое аддитивное формообразование с использованием проволоки является одним из наиболее перспективных методов производства крупногабаритных изделий. Его основными преимуществами является наличие вакуумной защиты расплавленно-го и нагретого металла, а также высокая производительность. В настоящее время ЭЛАФ активно развивается, однако, несмотря на это, определению режимов и особенно исследованию влияния технологических разверток электронного луча на форму валиков и свойства металла не уделяется достаточного внимания.

Представлены результаты исследования влияния основных параметров режима наплавки, а также формы и параметров развертки на форму валиков, стабильность и эффективность процесса наплавки титанового сплава СРТ-2 на подложку из сплава ВТ6.

Было установлено, что увеличение скорости наплавки приводит к увеличению КПД процесса наплавки и увеличению проплавления подложки.

Показано, что увеличение размера источника теплоты за счет увеличения диаметра развертки в форме концентрических окружностей позволяет регулировать ширину валика, однако в ограниченных пределах. При использовании проволоки диаметром 1,2 мм удалось увеличить ширину валика с 5,97 до 9,32 мм – в 1,5 раза.

При наплавке с использованием развертки в форме зигзага на частотах от 3,5 до 100 Гц отмечено, что гарантированно стабильное формирование наблюдается при наиболее высоких частотах – 70 и 100 Гц, а в области низких частот стабильность формирования валиков зависит от частоты нелинейно – при 3,5 Гц формирование стабильное, а при 7 и 35 Гц – нет.

Снижение мощности электронного луча приводит к росту высоты валика и снижению его ширины.

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

A.V. Gudenko, A.P. Sliva, D.V. Shishkin

¹National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,
Moscow, Russian Federation

**THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL OSCILLATION PARAMETERS ON THE BEAD
FORMATION DURING WIRE-FEED ELECTRON-BEAM ADDITIVE MANUFACTURING**

Electron beam wire-feed additive manufacturing is one of the most promising methods to produce large-sized products. Its main advantages are the presence of vacuum protection of molten and heated metal, as well as high performance. Currently, this method is actively developing, but despite this, not enough attention is paid to the definition of modes and especially to the study of the influence of technological electron beam oscillations on the bead shape and the properties of the metal.

The article presents the results of a study of the influence of the main parameters of the wire deposition mode, as well as the shape and oscillation parameters on the shape of the beads, the stability and efficiency of the deposition process using SPT-2 titanium alloy wire and VT6 alloy substrate.

It was found that an increase in the deposition rate leads to an increase in the efficiency of the deposition process and an increase in the penetration of the substrate.

It is shown that an increase in the size of the heat source due to an increase in the diameter of the concentric circles oscillation allows you to adjust the width of the bead, but within certain limits. When using a wire with a diameter of 1.2 mm, it has been possible to increase the width of the roller from 5.97 mm to 9.32 mm – by 1.5 times.

When surfacing using a zigzag oscillation at frequencies from 3.5 to 100 Hz, it has been noted that stable formation is guaranteed at the highest frequencies-70 and 100 Hz, and in the low frequency region, the stability of the bead formation depends on the frequency non-linearly – at 3.5 Hz, the formation is stable, and at 7 and 35 – not.

A decrease in the power of the electron beam leads to an increase in the height of the bead and a decrease in its width.

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

Введение

На сегодняшний день множество работ в области электронно-лучевого аддитивного производства с использованием проволоки посвящено исследованию микроструктуры и свойств наплавленного металла [1–7]. В то же время работ по определению параметров режима процесса наплавки достаточно мало, что подтверждают и авторы работы [8]. Определение оптимального режима наплавки является сложной задачей в силу большого количества варьируемых параметров наплавки: ускоряющего напряжения, тока электронного луча, скорости подачи присадочной проволоки, скорости наплавки, формы и параметров развертки луча, фокусировки, угла подачи проволоки, положения кончика проволоки относительно подложки и др.

Можно достаточно уверенно говорить о том, как влияет на геометрию валиков скорость подачи проволоки, скорость наплавки и изменение тока электронного луча. В работах [8, 9] авторы показывают, что при наплавке одиночных валиков увеличение мощности луча приводит к увеличению ширины валика, в то время как увеличение скорости подачи проволоки и скорости наплавки приводит к увеличению высоты валика. Влияние развертки электронного луча на формирование валиков, их геометрию, микроструктуру и свойства, возможно, является наименее очевидным среди прочих параметров наплавки и наименее изученным.

По характеру влияния на формирование сварного шва технологические развертки электронного луча можно разделить условно на два типа – статический и динамический [10]. «Статические» развертки применяются для перераспределения плотности мощности луча в зоне обработки, к ним, как правило, относятся такие формы развертки, как концентрические окружности и эллипсы, X-образные развертки и др. Особенность статической развертки – высокие частоты, при которых тепловые и гидродинамические процессы в канале проплавления не испытывают возмущений, так как скорость их реакции на изменение положения электронного луча существенно ниже частоты развертки. «Динамические» развертки электронного луча используются не только для перераспределения плотности мощности в зоне обработки, но и для влияния на гидродинамические процессы в канале проплавления, например для интенсификации переноса жидкого металла с фронта плавления к фронту кристаллизации. Главным отличием динамических разверток от статических являются сравнительно низкие частоты – приблизительно до 100 Гц. Использование динамической развертки, например

пилообразной или зигзагообразной формы, при которой электронный луч совершает циклические движения в направлении от жидкой ванны к уже затвердевшему валику, приводит к существенно изменению геометрии сварного шва или наплавленного валика, по сравнению с использованием статического типа развертки либо без использования развертки [10–12]. Такой эффект характерен не только для электронно-лучевой сварки и наплавки, но и для дуговых методов аддитивного производства; например, в работах [13, 14] показано, что применение продольной развертки с частотой 10 Гц позволяет получать более тонкие стенки, повысить однородность наплавленного металла и увеличить эффективность процесса наплавления.

Целью исследования является оценка влияния параметров электронно-лучевой наплавки на форму и геометрические размеры наплавленных одиночных валиков.

Методика

Электронно-лучевая наплавка одиночных валиков проводилась на установке АЭЛТК-344-12 (АО «НИТИ „Прогресс“») с ускоряющим напряжением 60 кВ, оснащенной механизмом подачи присадочной проволоки. Переменными параметрами при наплавке являлись: ток электронного луча I , скорость подачи присадочной проволоки w , скорость наплавки V , форма и параметры развертки электронного луча – частота f и продольная и поперечная амплитуды развертки A_x и A_y . На схеме процесса направление оси Ox совпадает с направлением скорости наплавки V (рис. 1).

Наплавка валиков выполнялась с использованием проволоки из титанового сплава СПТ-2 диаметром 1,2 мм на подложку из сплава ВТ6ч в виде плиты толщиной 10 мм. Химический состав сплавов указан в табл. 1.

В работе использовались развертки динамического типа – пилообразная и зигзагообразная, и статического типа – в виде трех концентрических окружностей (рис. 2).

Для пилообразной развертки показана зависимость координаты движения луча вдоль оси Ox от времени $x(t)$. Направление оси Ox совпадает с направлением наплавки. При такой развертке движение электронного луча вдоль оси Oy отсутствует. Для зигзагообразной развертки стрелками показано направление движения луча вдоль развертки.

После наплавки были изготовлены поперечные шлифы полученных образцов, которые травились в растворе с соотношением 1:2:5 HF:HNO₃:H₂O [15].

Таблица 1

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

Сплав	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

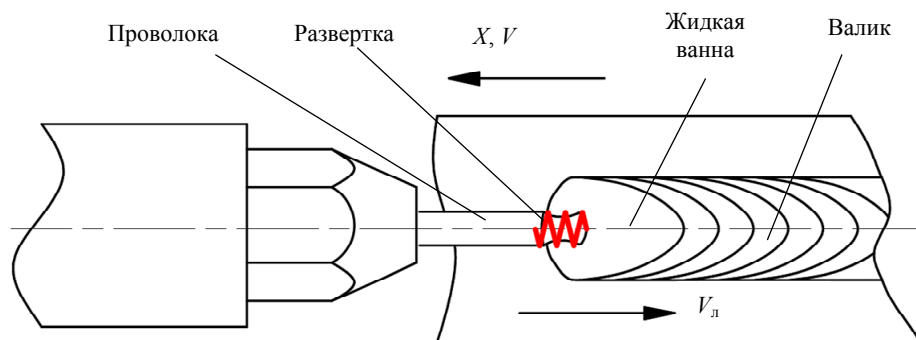
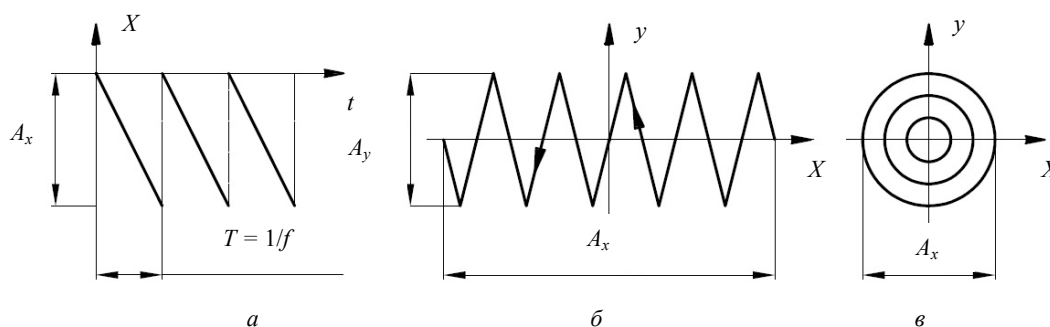
Рис. 1. Схема наплавки с использованием развертки в форме зигзага: $V_{л}$ – скорость движения луча вдоль продольного направления развертки, V – направление наплавки

Рис. 2. Исследуемые формы развертки: а – пилообразная; б – зигзаг; в – в виде трех концентрических окружностей

Влияние основных параметров режима наплавки на форму и размеры валиков

На форму наплавляемых валиков определяющее значение в первую очередь оказывают основные параметры процесса наплавки – мощность электронного луча q , скорость подачи проволоки w и скорость наплавки V . Помимо формы самого валика изменяется степень проплавления основного металла, что является важным показателем при определении режима наплавки многослойных изделий. Большой объем проплавленного металла подложки говорит об избыточном тепловложении в металл, что приводит не только к увеличению ширины валика, но и к изменению структуры металла – увеличению размеров зерен и, следовательно, ухудшению его механических свойств.

В работе проводилась оценка влияния w , V и I на долю проплавления основного металла γ и КПД процесса наплавки η . Режимы наплавки показаны в табл. 2. При наплавке использовалась развертка электронного луча статического типа – в форме трех концентрических окружностей с частотой 1000 Гц и диаметром 2,5 мм. Фокусировка луча во всех случаях была острая. Часть валиков была выполнена при различных комбинациях V , w и I , выбранных таким образом, чтобы удельная энергия E была одинаковой. Удельная энергия E равняется отношению мощности электронного луча к объему металла проволоки, подаваемого в единицу времени, и рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{q}{wF} = \frac{UI}{wF},$$

где F – площадь поперечного сечения проволоки; I – ток луча; U – ускоряющее напряжение. Удельная энергия является удобным показателем для сравнения режимов наплавки, несмотря на то, что энергия тратится не только на плавление проволоки, но и на плавление подложки, поскольку объем проплавленного металла подложки заранее предсказать затруднительно.

Доля проплавления γ равна отношению площади поперечного сечения проплавленного металла подложки F_s к сумме площадей F_s и площади наплавленного валика F_b :

$$\gamma = \frac{F_s}{F_s + F_b}$$

КПД процесса наплавки η рассчитывался как произведение эффективного КПД электронно-лучевой обработки η_e и термического КПД η_t [18, 19]:

$$\eta = \eta_t \eta_e = \frac{\rho(cT_m + L_m)}{UI} V(F_s + F_b),$$

где ρ – плотность сплава; c – удельная теплоемкость; T_m – температура плавления сплава и L_m – удельная теплота плавления сплава [20]. Рассчитывать КПД наплавки η как произведение η_e и η_t более целесообразно, поскольку η_e во время наплавки, когда отсутствует глубокий канал проплавления, может быть значительно ниже единицы, в отличие от процесса электронно-лучевой сварки, где η_e обычно принимают равным 0,95–0,97 [21].

Таблица 2

Режимы наплавки для оценки влияния на геометрию валиков

Номер режима	V , мм/мин	w , м/мин	I , мА	E , Дж/мм ³	γ	η
1	250	1	7	22,29	0,025	0,24
2		2	14	22,29	0,22	0,28
3		3	21	22,29	0,26	0,34
4	500	2	21	33,44	0,50	0,34
5		4	28	22,29	0,42	0,41
6		6	38	20,17	0,39	0,48
7		10	45	14,33	0,28	0,54

Влияние размера источника теплоты

Форма наплаваемых валиков зависит в том числе от размера источника теплоты. Его размер при электронно-лучевой обработке можно регулировать не только за счет изменения положения фокальной плоскости луча при наплавке, но также и изменением продольной и поперечной амплитуд разверток A_x и A_y без изменения фокусировки.

На форму валиков – ширину и высоту – в большей степени влияет поперечный размер источника теплоты – поперечная амплитуда разверт-

ки A_y . Для изучения зависимости формы валиков от размеров источника теплоты были наплавлены валики на режиме 7 в табл. 2. При этом использовались развертки в форме трех концентрических окружностей различных диаметров, параметры этих разверток указаны в табл. 3. Пилообразная развертка была использована как предельный случай с поперечной амплитудой A_y , равной нулю. Ее продольный размер, амплитуда A_x , равен нулю.

Ширина валика измеряется на поверхности подложки, высота валика отсчитывается также от поверхности подложки.

Таблица 3

Параметры развертки электронного луча и характеристики получаемых валиков

Номер режима	Форма развертки	Диаметр d , мм (A_y)	f , Гц	Ширина валика B , мм	Высота валика H , мм	γ	η
8	В виде трех концентрических окружностей	2,5	1000	7,05	4,33	0,28	0,54
9		4		8,76	3,44	0,29	0,54
10		5,5		9,32	3,36	0,31	0,54
11	Пилообразная, $A_x = 2,5$ мм	$A_y = 0$ мм	140	5,97	4,88	0,28	0,55

Влияние частоты продольной развертки

Особый интерес представляет применение разверток динамического типа, при которых электронный луч совершает направленное движение от фронта плавления жидкой ванны к фронту кристаллизации. В этом случае геометрические параметры наплаваемых валиков определяются параметрами развертки – продольной и поперечной амплитудами, а также частотой.

Для оценки влияния частоты развертки на формирование валиков использовали зигзагообразную форму развертки (см. рис. 2) с различными частотами (табл. 4) на режиме 7 (см. табл. 2), фокусировка – острая. Основное направление движения луча при использовании развертки – от фронта плавления металла к фронту кристаллизации (см. рис. 1, 2) – совпадает с направлением движения проволоки. Продольная амплитуда $A_x = 2,5$ мм, поперечная $A_y = 1,6$ мм.

Таблица 4

Параметры зигзагообразной развертки

Номер режима	f , Гц	Ширина валика B , мм	Высота валика H , мм	γ	η
12	3,5	5,94	4,38	0,5	0,65
13	7	5,95	4,09	0,35	0,57
14	35	6,18	4,72	0,35	0,6
15	70	6,25	4,72	0,34	0,53
16	100	6,31	4,82	0,30	0,56

Влияние тока луча на геометрию валика при использовании пилообразной развертки

Влияние тока луча оценивалось при наплавке валиков на токах луча 40, 35 и 30 мА с использованием пилообразной развертки, остальные параметры – по режиму № 7 (см. табл. 2), развертки – по режиму № 16 (см. табл. 4).

Результаты

Влияние основных параметров режима на геометрию валиков

Пропорциональное увеличение скорости подачи проволоки w и тока луча I при постоянной скорости наплавки V и удельной энергии E приводит к увеличению доли проплавления подложки γ и КПД наплавки η (рис. 3, а–в, режимы 1–3 в табл. 2). Это связано с тем, что при малых значениях w и I оплавление основного металла незначительно (см. рис. 3, а) и отсутствует интенсивное перемешивание наплавляемого металла с основным металлом, в результате чего практически вся энергия электронного луча расходуется на нагрев проволоки, что, по-видимому, приводит к перегреву наплавляемого металла и снижению энергетической эффективности процесса наплавки. В то же время увеличение этих параметров приводит к увеличению доли теплоты, вкладываемой в подложку, растет объем общей сварочной ванны и интенсивность перемешивания, в результате чего увеличивается термический КПД. Также надо сказать, что экстремальные значения доли проплавления γ , близкие к нулю, не являются оптимальными при

определении режима, поскольку помимо чрезмерного перегрева жидкого металла возрастает вероятность возникновения несплавления вследствие недостаточного прогрева подложки.

Наплавка с постоянной скоростью наплавки V и удельной энергией E подразумевает, что скорость подачи w и ток луча I , а следовательно, и мощность луча q изменяются прямо пропорционально, при этом мощность q расходуется на плавление проволоки и плавление подложки. Зная, что мощность, требуемая для плавления проволоки, растет линейно скорости ее подачи [10], можно сделать вывод о том, что при неизменной V больше мощности вкладывается на единицу длины подложки, что в итоге и приводит к увеличению γ и η .

При наплавке валиков с отличающимися w , V и I в 2 раза (см. режимы 2 и 5 в табл. 2) сохраняется не только удельная энергия E , но и площадь наплавленного металла F_b (см. рис. 3, б и д соответственно). Однако валик, выполненный с большими w , V и I , имеет существенно большую долю проплавления γ и КПД η . Это говорит о том, что в процессе наплавки тенденция увеличения КПД при увеличении скорости наплавки подобна увеличению термического КПД с ростом скорости электронно-лучевой сварки [16, 17]. Это связано с тем, что при увеличении скорости сварки и наплавки меньше вкладываемой энергии тратится на теплопроводность и нагрев металла без оплавления.

Зависимость доли проплавления γ от удельной мощности E при постоянной скорости наплавки $V = 500$ мм/мин (см. табл. 2, режимы 4–7, см. рис. 3, г–ж) близка к линейной (рис. 4).

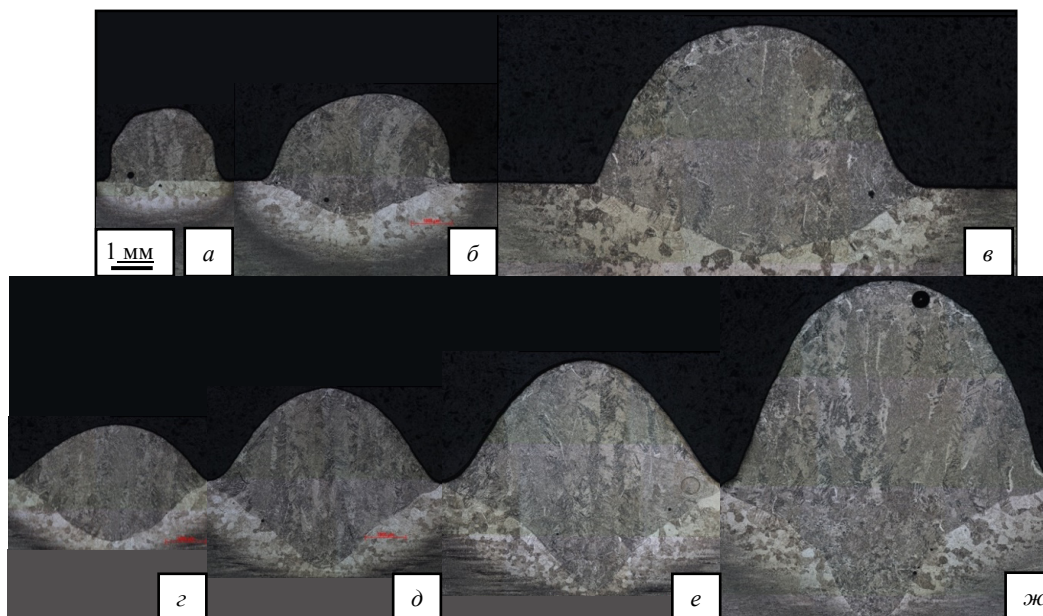


Рис. 3. Поперечные сечения валиков. Режимы – см. табл. 2

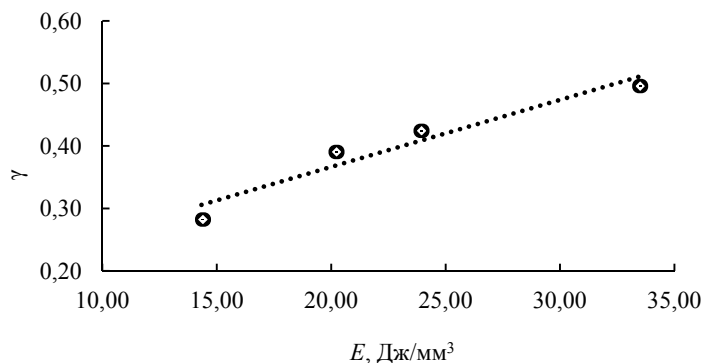


Рис. 4. Зависимость доли проплавления основного металла γ от удельной энергии E при постоянной скорости наплавки

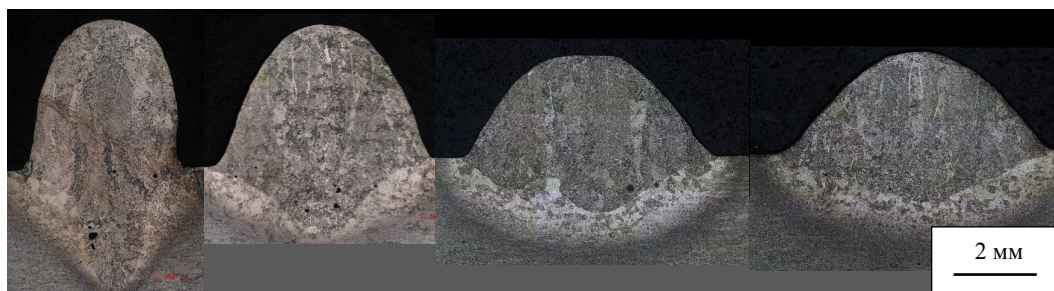


Рис. 5. Поперечные сечения валиков, выполненных с различными амплитудами (режимы указаны в табл. 3). Слева направо: $A_y = 0$ мм (пилообразная развертка); $d = 2,5$ мм; $d = 4$ мм; $d = 5,5$ мм

Влияние размера источника теплоты

Увеличение диаметра концентрических окружностей от 2,5 до 5,5 мм при наплавке валиков приводит к увеличению ширины наплавляемых валиков и уменьшению их высоты (рис. 5, 6). Уменьшение размера источника в поперечном направлении до амплитуды $A_y = 0$ мм за счет применения пилообразной развертки приводит к еще большему уменьшению ширины и росту высоты валика. Параметры режимов наплавки указаны в табл. 3.

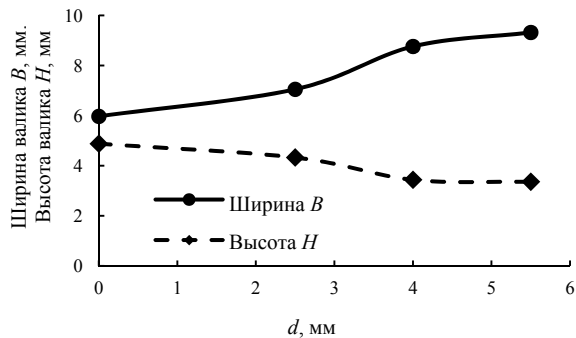


Рис. 6. Зависимость ширины B и высоты H валиков от диаметра развертки d . Точка $d = 0$ мм соответствует пилообразной развертке, у которой $A_y = 0$ мм

Характер зависимости на рис. 6 демонстрирует предел возможности увеличения ширины валика ширины за счет увеличения размера источника теплоты, в частности от d . При значениях d , близких к 5,5 мм, график зависимости асимптотически приближается к значению максимальной ширины валика – порядка 10 мм. При этом дальнейшее увеличение d сверх 5,5 мм практически не будет влиять на ширину валика. При увеличении d от 0 до 5,5 мм ширина валика изменяется от 5,97 до 9,32 мм, т.е. более чем в 1,5 раза. В то же время высота валика уменьшилась от 4,88 до 3,36 мм – в 1,45 раза. Таким образом, существует возможность управления формой валиков только за счет применения развертки. При этом КПД наплавки η и доля проплавления γ практически не изменяются при изменении поперечной амплитуды развертки.

Регулирование формы валиков за счет применения разверток может быть выгоднее с точки зрения снижения вероятности образования дефектов и управления структурой металла при наплавке, по сравнению с изменением фокусировки электронного луча. Однако у такого метода регулирования формы валиков есть ограничения, одним из основных является диаметр подаваемой проволоки.

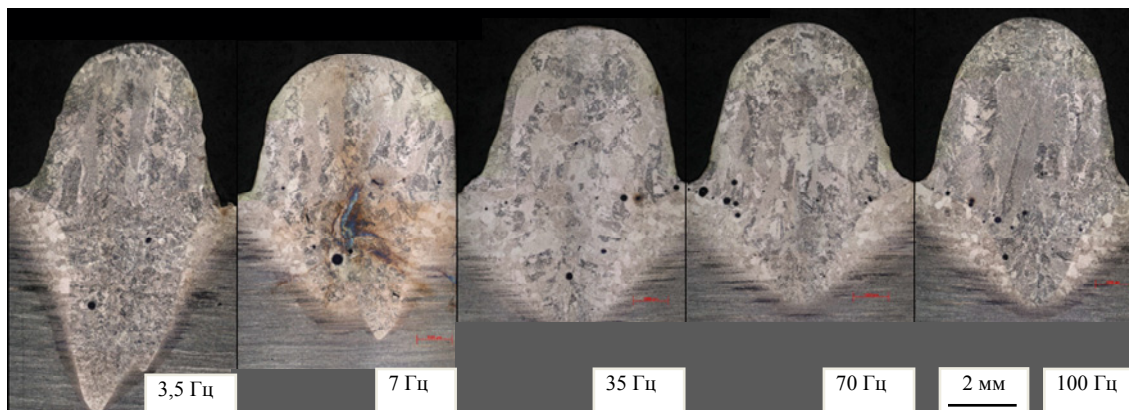


Рис. 7. Поперечные сечения валиков, выполненных на режимах 12–16 (см. табл. 4). Числа показывают частоту развертки f

Влияние частоты продольной развертки на формирование валиков

По аналогии с применением динамического типа развертки при ЭЛС [12] изменение частоты развертки должно существенно влиять на стабильность, а также форму валиков. Под стабильностью формирования валиков понимается постоянство формы и геометрических параметров валика по длине наплавки. Наиболее стабильное формирование валиков отмечается на частотах 70 и 100 Гц. Несмотря на низкую частоту развертки, стабильное формирование валиков можно также отметить на частоте 3,5 Гц. При 7 Гц наблюдаются периодические колебания высоты и ширины валиков, а также участки с неполностью расплавленной проволокой. При 35 Гц также наблюдается нестабильность, однако менее выраженная в сравнении с 7 Гц (рис. 7). На рис. 7 показаны поперечные сечения валиков на частотах 3,5; 7; 35, 70 и 100 Гц.

Нарушение стабильности на низких частотах может быть вызвано несколькими причинами. Во-первых, при малых частотах развертки скорость движения луча вдоль продольного направления развертки V_x близка к скорости наплавки V . Данную ситуацию можно проиллюстрировать на графике (рис. 8). Электронная пушка перемещается вдоль оси X , координата пушки обозначена X_n . В то же время электронный луч относительно электронной пушки движется в обратном направлении, положение луча относительно пушки обозначено X_l . Фактическое положение электронного луча на подложке $X_{рез}$ является результатом вычитания координат: $X_{рез} = |X_n| - |X_l|$. При скорости наплавки $V = 500$ мм/мин = 8,33 мм/с, а также при частоте развертки $f = 3,5$ Гц и амплитуде $A_x = 2,5$ мм, при которых скорость движения луча вдоль развертки $V_x = 8,75$ мм/с, электронный пучок в течение периода развертки практически не перемеща-

ется вдоль подложки (зеленая линия) и его положение будет меняться через каждый период действия развертки $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{3,5} = 0,286$ с на величину амплитуды $A_x = 2,5$ мм.

Следовательно, при выборе низких частот наплавки вероятно нарушение стабильности формирования валиков из-за нестабильного плавления подложки.

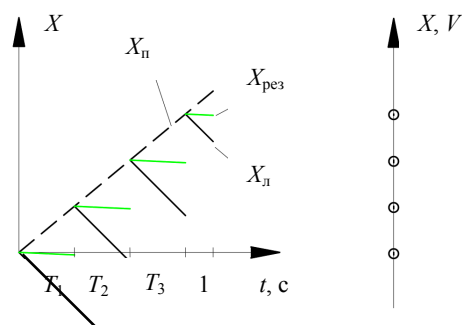


Рис. 8. Координата луча на подложке при скорости наплавки $V = 500$ мм/мин, а также при частоте развертки $f = 3,5$ Гц и амплитуде развертки $A_x = 2,5$ мм: T – периоды действия развертки. Справа показаны точки на траектории движения пушки вдоль подложки, в которых фактически находится пучок при таких параметрах

Другой вероятной причиной нестабильности на низких частотах развертки может являться малая скорость перемещения электронного луча V_x по сравнению со скоростью подачи проволоки w . Для пояснения рассмотрим две ситуации: первая, при которой скорость $V_x = w$, и вторая, при которой скорость $V_x = 2w$ (рис. 9).

При равных скорости движения луча вдоль продольного направления развертки V_x и скорости подачи проволоки w электронный луч в течение всего периода развертки неподвижен относительно проволоки. В конце периода луч резко перебрасыва-

вається из конечной точки развертки в начальную, в результате чего луч «отрезает» кусочек проволоки (на рис. 9 обозначен штриховкой), который затем попадает в жидкую ванну и может как расплавиться, так и нет в случае, если не хватит запаса энергии жидкой ванны для его плавления.

При $V_x = 2w$ электронный луч как минимум один раз проходит по всем точкам проволоки, расплавляя ее в полном объеме.

Эти скорости можно назвать критическими скоростями движения луча вдоль развертки: $V_x = 2w$ – критическая скорость движения луча вдоль продольного направления развертки, при которой происходит полное оплавление луча, а $V_x = w$ – скорость, при которой длина нерасплавленного участка равняется продольной амплитуде A_x . При скорости $V_x > 2w$ плавление проволоки также будет происходить в полном объеме. При $w < V_x < 2w$ длина расплавляемого участка будет меньше амплитуды A_x . А уменьшение до значений $V_x < w$ не будет приводить к увеличению нерасплавленного участка проволоки.

В случае, когда скорость подачи проволоки $w = 10$ м/мин = 166,6 мм/с, минимальная частота развертки при $A_x = 2,5$ мм, при которой $V_x = w$, будет

$$f = \frac{w}{A_x} = \frac{166,6}{2,5} = 66,6 \text{ Гц.}$$

Соответственно, при низких частотах будет гарантированное нерасплавление участка проволоки. Попадание части проволоки в твердом состоянии в сварочную ванну будет приводить к охлаждению жидкой ванны, изменению циркуляции металла в ванне, а следовательно, к изменению

условий кристаллизации металла и изменению структуры. Однако при недостаточном запасе тепла сварочной ванны может происходить неполное сплавление и появление дефектов.

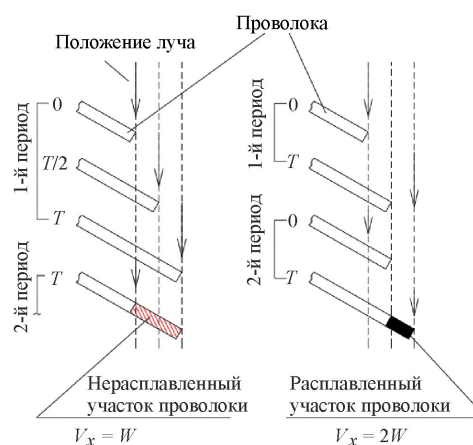


Рис. 9. Схема выбора скорости движения луча вдоль развертки

Описанный выше механизм «отрезания» кусочка проволоки при низких частотах подтверждается высокоскоростной съемкой процесса наплавки с частотой развертки 35 Гц (режим развертки 14 в табл. 4, режим наплавки – режим 7 в табл. 2, рис. 10).

Кусочек проволоки отрезается в течение $2/8T$ – периода действия развертки, а течение следующих $2/8T$ этот кусочек проволоки видно на поверхности жидкой ванны, после чего он тонет в жидкой ванне. В оставшуюся половину периода электронный луч воздействует на жидкую ванну, что дополнительно может способствовать расплавлению отрезанного кусочка проволоки.

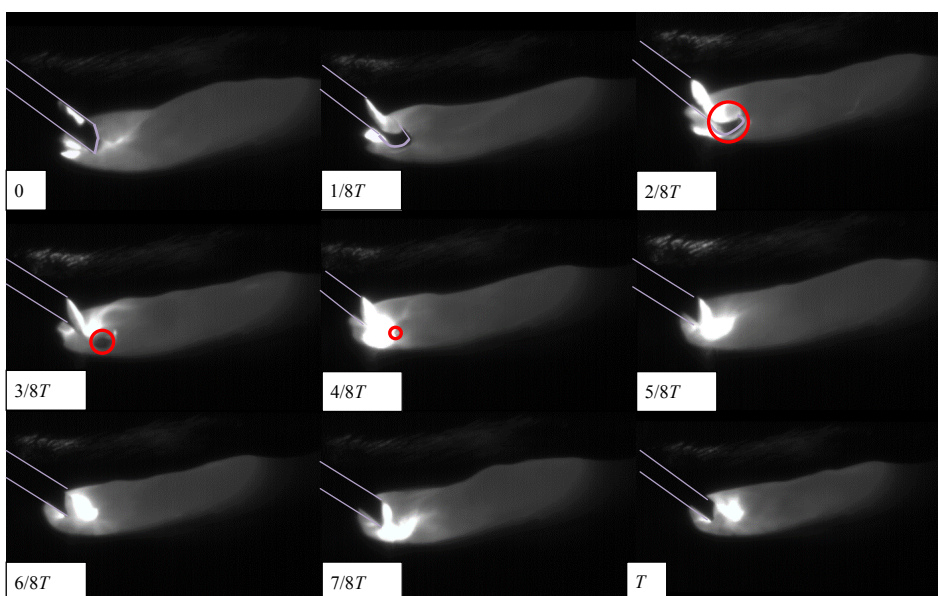


Рис. 10. Раскадровка процесса наплавки в течение одного периода действия развертки T . Скорость съемки – 2000 кадров/с, частота развертки $f = 35$ Гц

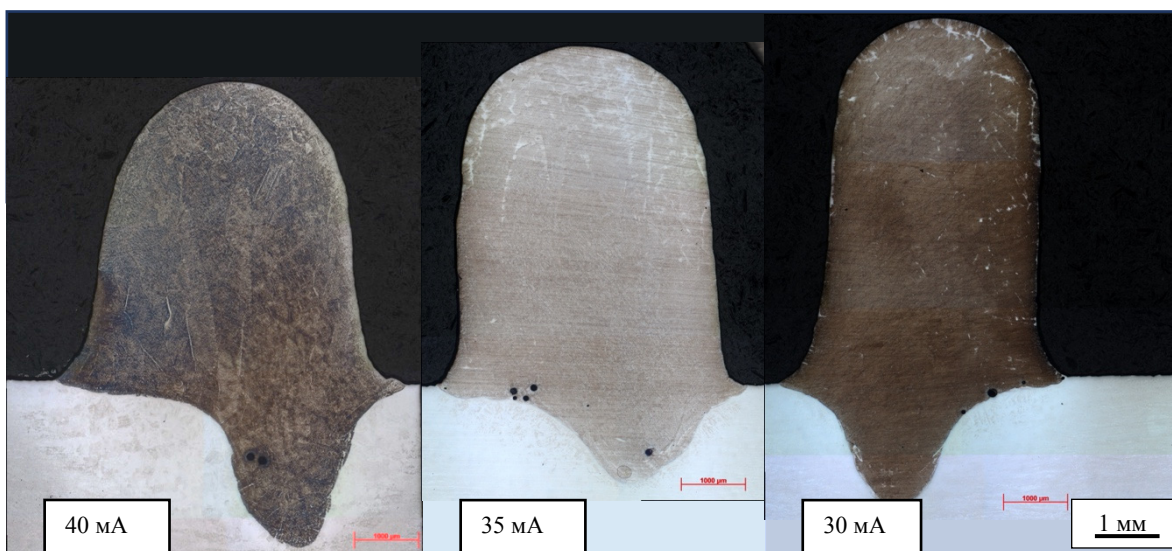


Рис. 11. Поперечные шлифы валиков, выполненных с использованием пилообразной развертки

Применение низких частот разверток электронного луча, вероятно, приведет к изменению условий кристаллизации металла как за счет возможного попадания кусочка проволоки в жидкую ванну, так и за счет импульсного характера воздействия электронного луча на жидкий металл, что скажется на микроструктуре и свойствах получаемых валиков.

Однако использование низких частот разверток при наплавке ограничено из-за нестабильности формирования валиков. Тем не менее в области низких частот зависимость стабильности формирования от частоты развертки, по всей видимости, носит нелинейный характер. Это позволяет сделать предположение о том, что существуют частоты, при которых будет сохраняться стабильность при наплавлении валиков, а следовательно, это позволит регулировать структуру наплавленного металла и улучшать его механические свойства.

Влияние тока луча на геометрию валика при использовании пилообразной развертки

Уменьшение тока от 40 до 30 мА при наплавке валика с использованием пилообразной развертки привело к увеличению высоты валика и уменьшению ширины (рис. 11, 12).

Увеличение высоты валика и уменьшение ширины произошло приблизительно на 20 %. Также угол между стенками на середине высоты каждого валика уменьшился и составил 13°, 8° и 2° соответственно для токов луча 40, 35 и 30 мА. Снижение мощности электронного луча приводит к уменьшению температуры жидкой металлической ванны и росту коэффициента поверхностного натяжения, что препятствует растеканию металла по поверхности валика и вместе с влиянием пилообраз-

ной развертки на перенос жидкого металла приводит к росту высоты валика и снижению его ширины.

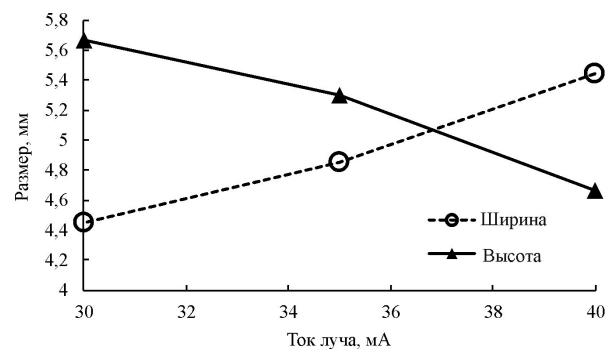


Рис. 12. Зависимость геометрических параметров валиков от частоты пилообразной развертки

Использование пилообразной развертки при малых тепловложениях перспективно для получения тонкостенных изделий. Данный подход способен увеличить производительность изготовления тонкостенных элементов, увеличить коэффициент использования материала за счет увеличения точности, которое достигается за счет получения параллельных стенок.

Выводы

Выполнение одиночных валиков методом электронно-лучевого аддитивного формообразования с использованием проволоки с различными параметрами режима и развертки электронного луча позволило сделать следующие выводы:

1. Увеличение скорости наплавки при сохранении размеров валика приводит к увеличению КПД процесса наплавки и увеличению проплавления подложки, что согласуется с аналогичными тенденциями при электронно-лучевой сварке.

2. Увеличение размера источника теплоты за счет увеличения диаметра развертки в форме концентрических окружностей позволяет регулировать ширину валика, однако в ограниченных пределах. При использовании проволоки диаметром 1,2 мм удалось увеличить ширину валика с 5,97 (продольная развертка) до 9,32 мм (кольцевая развертка диаметром 5,5 мм) – в 1,5 раза, дальнейшее увеличение диаметра кольцевой развертки не является эффективным средством увеличения ширины валика.

3. Использование «динамической» развертки позволяет интенсифицировать перенос жидкого металла в наплавочную ванну и тем самым увеличить высоту получаемых валиков, особенно в сочетании с уменьшением тока луча для снижения температуры жидкой ванны и поверхностного натяжения.

4. Однако необходимо тщательно подходить к выбору частоты развертки, так как возможно нестабильное формирование валиков. При равенстве скоростей движения электронной пушки относительно подложки и перемещения луча вдоль продольного направления развертки электронный пучок неподвижен относительно подложки в течение всего периода развертки, что приводит к нестабильному плавлению подложки. При равенстве скоростей подачи проволоки и перемещения луча вследствие развертки происходит нестабильное плавление проволоки и возможно образование дефектов в наплавленном валике.

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

Список литературы

1. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel / S.Yu. 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.
2. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-feed electron beam additive manufactured Ti–5Al–2Sn–2Zr–4Mo–4Cr alloy with different subtransus heat treatments / Guodong Zhang, Huaping Xiong, Huai Yu, Renyao Qin, Wei Liu, Hong Yuan // Materials & Design. – 2020. – Vol. 195. – 109063. – P. 1–12.
3. High frequency vibration fatigue behavior of Ti6Al4V fabricated by were-fed electron beam additive manufacturing technology / P. Wanjara, J. Gholipour, E. Watanabe, K. Watanabe, T. Sugino, P. Patnaik [et al.] // Advances in Materials Science and Engineering. – 2020. – 1902567. – P. 1–14.
4. The electron beam freeform fabrication of NiTi shape memory alloys. Part I: Microstructure and physical-chemical Behavior / R.P.M. Guimarães, F. Pixner,

G. Trimmel, J. Hobisch, T. Rath, F. Fernandez, N. Enzinger, S.T. Amancio-Filho // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. – 2021. – Vol. 235, no. 4. – P. 709–716.

5. Improving mechanical properties of wire-based EBAM Ti–6Al–4V parts by adding TiC powders / A.V. Panin, M.S. Kazachenok, E.A. Sinyakova, A.O. Builuk, S.A. Martynov S.V. Panin, F. Berto // Material Design and Processing Communications. – 2021. – Vol. 3, no. 1. – 3:e136. – P. 1–6.

6. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample / V. Utyaganova, A. Filippov, S. Tarasov, N. Shamarin, D. Gurianov, A. Vorontsov, A. Chumaevskii, S. Fortuna, N. Savchenko, V. Rubtsov, E. Kolubaev // Materials Characterization. – 2021. – Vol. 172. – 110867. – P. 1–12.

7. Controlling the porosity using exponential decay heat input regimes during electron beam wire-feed additive manufacturing of Al–Mg alloy / V. Utyaganova, A. Filippov, N. Shamarin [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 108. – P. 2823–2838.

8. 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.

9. 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.

10. 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 Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 681. – 012008. – P. 1–6.

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

12. Слива А.П. Повышение качества сварных соединений при ЭЛС с осцилляцией электронного пучка сплавов алюминия со сквозным проплавлением // Электроно-лучевая сварка и смежные технологии: сб. материалов и докладов Второй междунар. конф., г. Москва, 14–17 ноября 2017 г. – М., 2017. – С. 506–520.

13. 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. – 116723. – P. 1–15.

14. 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.

15. Fan Z., Feng H. Study on selective laser melting and heat treatment of Ti–6Al–4V alloy // Results in Physics. – 2018. – Vol. 10. – P. 660–664.

16. Terentyev E.V., Sliva A.P., Santalova Yu.V. Effect of welding speed on electron beam welding thermal efficiency // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 969. – 012096.

17. Goncharov A.L., Sliva A.P., Kharitonov I.A. Dependence of weld penetration shape on energy efficiency in electron beam welding process // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 969. – 012097. – P. 1–6.

18. Особенности формирования изделий методом электронно-лучевой наплавки / А.В. Гуденко, А.П. Слива, В.К. Драгунов, А.В. Щербаков // Сварочное производство. – 2018. – № 8. – С. 12–19.

19. Гуденко А.В., Драгунов В.К., Слива А.П. Методика определения режимов послойной электронно-лучевой наплавки проволоки для аддитивных технологий // Вестник Московского энергетического института. – 2017. – № 5. – С. 8–14.

20. Thermophysical properties of solid and liquid Ti–6Al–4V (TA6V) alloy / M. Boivineau, C. Cagran, D. Doyter, V. Eyraud, M.-H. Nadal, B. Wilthan, G. Pottlacher // International Journal of Thermophysics. – 2006. – Vol. 27, no. 2. – P. 507–529.

21. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии: учеб. пособие для вузов по специальности «Машины и технология высокоэффективных процессов обработки» / Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ). – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 162 с.

References

1. Tarasov S.Yu., 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.

2. Guodong Zhang, Huaping Xiong, Huai Yu, Renyao Qin, Wei Liu, Hong Yuan Microstructure evolution and mechanical properties of wire-feed electron beam additive manufactured Ti–5Al–2Sn–2Zr–4Mo–4Cr alloy with different subtransus heat treatments. *Materials and Design*, 2020, vol. 195, pp. 1–12.

3. Wanjara P., Gholipour J., Watanabe E., Watanabe K., Sugino T., Patnaik P. et al. High frequency vibration fatigue behavior of Ti6Al4V fabricated by wire-feed electron beam additive manufacturing technology. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, pp. 1–14.

4. Guimarães R.P.M., Pixner F., Trimmel G., Hobisch J., Rath T., Fernandez F., Enzinger N., Amancio-Filho S.T. The electron beam freeform fabrication of NiTi shape memory alloys. Part I: Microstructure and physicochemical Behavior. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2021, vol. 235, no. 4, pp. 709–716.

5. Panin A.V., Kazachenok M.S., Sinyakova E.A., Builuk A.O., Martynov S.A., Panin S.V., Berto F. Improving mechanical properties of wire-based EBAM Ti–6Al–4V parts by adding TiC powders. *Material Design and Processing Communications*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 1–6.

6. Utyaganova V., Filippov A., Tarasov S., Shamarin N., Gurianov D., Vorontsov A., Chumaevskii A., Fortuna S., Savchenko N., Rubtsov V., Kolubaev E. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample. *Materials Characterization*, 2021, vol. 172, pp. 1–12.

7. Utyaganova V., Filippov A., Shamarin N. et al. Controlling the porosity using exponential decay heat input regimes during electron beam wire-feed additive manufacturing of Al–Mg alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108, pp. 2823–2838.

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

9. 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.

10. 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: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 681, pp. 1–6.

11. 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 Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1109, pp. 1–10.

12. Sliva A.P. Povyshenie kachestva svarnykh soedinenii pri ELS s ostsiillatsiei elektronnogo puchka 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 Vtoroi mezhdunarodnoi konferentsii*. Moscow, 2017, pp. 506–520.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Terentyev E.V., Sliva A.P., Santalova Yu.V. Effect of welding speed on electron beam welding thermal efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 969, pp. 1–8.

17. Goncharov A.L., Sliva A.P., Kharitonov I.A. Dependence of weld penetration shape on energy efficiency in electron beam welding process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 969, pp. 1–6.

18. Gudenko A.V., Sliva A.P., Dragunov V.K., Shcherbakov A.V. Osobennosti formirovaniia izdelii metodom elektronno-luchevoi naplavki [Peculiarities of shaping products by electron-beam surfacing]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2018, no. 8, pp. 12–19.

19. Gudenko A.V., Dragunov V.K., Sliva A.P. Metodika opredeleniia rezhimov posloinoi elektronno-luchevoi naplavki provoloki dlia additivnykh tekhnologii [Methodol-

ogy for determining modes of layer-by-layer electron-beam surfacing of wire for additive technologies]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo institute*, 2017, no. 5, pp. 8–14.

20. Boivineau M., Cagran C., Doyter D., Eyraud V., Nadal M.-H., Wilthan B., Pottlacher G. Thermophysical properties of solid and liquid Ti–6Al–4V (TA6V) alloy. *International Journal of Thermophysics*, 2006, vol. 27, no. 2, pp. 507–529.

21. Zuev I.V. Obrabotka materialov kontsentriruyemyimi potokami energii: uchebnoe posobie dlia vuzov po spetsial'nosti «Mashiny i tekhnologiya vysokoeffektivnykh protsessov obrabotki» [Material treatment with concentrated energy flows]. MEI TU. Moscow: Izdatelstvo MEI, 1998, 162 p.

Получено 24.08.2021

Опубликовано 30.09.2021

Сведения об авторах

Гуденко Александр Викторович (Москва, Россия) – аспирант, ассистент кафедры технологий металлов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», e-mail: alexsguddy@gmail.com.

Слива Андрей Петрович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий металлов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», e-mail: slivap@mail.ru.

Шишкин Дмитрий Владимирович (Москва, Россия) – аспирант кафедры технологии металлов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», e-mail: mitshishkin@mail.ru.

About the authors

Alexander V. Gudenko (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate Student, Assistant, Department of Metal Technology, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, e-mail: alexsguddy@gmail.com.

Andrey P. Sliva (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metal Technology, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, e-mail: slivap@mail.ru.

Dmitry V. Shishkin (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, e-mail: mitshishkin@mail.ru.