

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ (05.04.00)

УДК 621.01

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-8-14

Методика определения режимов послойной электронно-лучевой наплавки проволоки для аддитивных технологий

А.В. Гуденко, В.К. Драгунов, А.П. Слива

Электронно-лучевая наплавка проволоки — процесс, предполагающий использование электронного луча в качестве источника энергии и проволоки как сырьевого материала для создания металлических изделий в вакуумной камере. Данная технология может быть широко использована в производстве благодаря большой экономии металла, высокой скорости построения деталей и хорошему качеству изделий.

Приведена разработка расчетной методики определения режимов электронно-лучевой наплавки проволоки из коррозионно-стойкой аустенитной стали 316L на подложку из такого же материала. Расчетный метод связывает основные параметры процесса: ток электронного луча, скорость подачи присадочной проволоки и перемещение электронной пушки (скорость наплавки) и их влияние на геометрию, микроструктуру и механические свойства полученных валиков. Указанная методика предполагает, что мощность электронного луча тратится на нагрев и плавление проволоки и материала подложки.

Для учета тепловых потерь введен термический коэффициент полезного действия (КПД) процесса. Анализ макроструктуры позволил оценить термический КПД и влияние основных параметров процесса на него. При анализе микроструктуры наплавленных валиков было отмечено, что при кристаллизации металла образуются столбчатые кристаллы (дендриты). Установлено, что определяющим фактором, влияющим на размер дендритов, является скорость перемещения электронной пушки (скорость наплавки), которая воздействует на скорость охлаждения расплавленного металла. При изучении твердости полученных валиков было выявлено, что значение твердости убывает с возрастанием высоты валиков. Твердость валиков увеличивается при увеличении скорости наплавки, что связано с увеличением скорости кристаллизации расплава и образованием более мелкозернистой структуры. Возрастание твердости ближе к корню валика объясняется более высоким температурным градиентом, чем в вершине. Значение твердости зависит от параметров источника теплоты, скорости перемещения источника теплоты (наплавки) и теплофизических особенностей материала.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электронный луч, наплавка.

Для цитирования: Гуденко А.В., Драгунов В.К., Слива А.П. Методика определения режимов послойной электронно-лучевой наплавки проволоки для аддитивных технологий // Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 8—14. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-8-14.

A Procedure for Determining the Operating Modes of Electron Beam Wire Feed Layer-Wise Deposition for Additive Manufacturing

A.V. Gudenko, V.K. Dragunov, A.P. Sliva

Electron beam wire feed deposition is a process that uses an electron beam as a power source and wire as raw material to fabricate metallic items in a vacuum chamber. This technology can be widely used for industrial applications due to its ability of using metal in a very efficient manner, making parts within a short period of time, and ensuring good quality of the produced items.

The article presents elaboration of the calculation method for determining the operation modes of the electron beam technology for depositing the metal of wire made of Grade AISI 316L corrosion-resistant austenitic steel on a substrate made of the same material. The calculation method correlates the main process parameters, including the electronic beam current, the additive wire feed rate, and the electron beam gun translation speed, and the effects these parameters have on the geometry, microstructure, and mechanical properties of the obtained beads. The method assumes that the electron beam power is spent for heating and melting the wire and the substrate material.

The production process thermal efficiency factor was introduced for taking into account the thermal losses. The item's macrostructure was analyzed, as a result of which the thermal efficiency was estimated together with the effect the main process parameters have on its value. It was noted in an analysis of the weld beads' microstructure that columnar crystals (dendrites) appear in the course of metal solidification. It has been found that the electron beam gun displacement speed (the deposition rate), a parameter affecting the molten metal cooling rate, is the key factor influencing the size of columnar grains. The hardness of the obtained beads was investigated, and the following conclusions have been drawn from those investigations. The deposited metal hardness decreases with increasing the bead height. The hardness of beads increases with the deposition rate, which is attributed to a higher melt crystallization rate and the formation of a more fine-grained structure. The growth of hardness toward the bead root is attributed to the fact that the temperature gradient in the root zone is higher than that at the bead top. It has also been found that the hardness value depends on the heat source parameters, the heat source traveling speed (the deposition rate), and the thermophysical properties of the material.

Key words: additive manufacturing, electron beam, metal deposition.

For citation: Gudenko A.V., Dragunov V.K., Sliva A.P. The Method of Determining the Modes of Wire Feed Electron Beam Deposition for Additive Manufacturing. MPEI Vestnik. 2017; 5:8—14. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-8-14.

Актуальность проблемы

Аддитивные технологии предполагают изготовление (построение) физического объекта методом послойного нанесения материала в отличие от традиционных методов формообразования детали, основанных на удалении материала из массива заготовки [1].

Одним из способов трехмерного производства является технология Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3) — метод, предполагающий использование электронного луча в качестве источника энергии и металлической проволоки в качестве сырья. Процесс последовательного нанесения материала происходит в вакуумной камере [2]. Геометрия наплавленного металла, микроструктура и механические свойства зависят от параметров процесса. При кристаллизации металла образуются столбчатые кристаллы (дендриты), размеры которых меняются в зависимости от скорости охлаждения. При этом механические свойства осажденного металла сравнимы со свойствами литого металла.

В России аддитивные технологии не получили широкого распространения, причем электронно-лучевые методы еще более редкие, чем лазерные. При работе с аддитивными технологиями часто возникают проблемы с выбором режимов обработки, которые обеспечивали бы требуемую степень проплавления основных материалов (подложки) и долю наплавленного металла.

Постановка и решение задачи

Основная цель данной работы заключается в разработке расчетной методики определения режимов электронно-лучевой наплавки проволоки из коррозионностойкой аустенитной стали 316L.

К основным параметрам процесса относятся: мощность электронного луча, скорость подачи присадочной проволоки и скорость наплавки. Они позволяют контролировать количество вводимой энергии, скорость наплавки металла и поперечные размеры профиля наплавленного валика. Геометрия наплавленных валиков зависит от количества проволоки, которая подается в жидкую ванну [3].

Помимо вышеупомянутых, существуют дополнительные параметры, такие как ориентация проволоки относительно электронного луча и подложки и параметры развертки электронного луча [4].

Правильный выбор всех параметров необходим для того, чтобы получить стабильный процесс наплавки металла на плоскую поверхность.

Для подбора основных параметров процесса предлагается модель, основанная на расчете вводимой в металл энергии для его расплавления (рис. 1). Она предполагает, что мощность электронного луча $q_{\text{л}}$ тратится на нагрев и плавление проволоки и материала подложки, причем часть этой энергии расходуется на нагрев подложки за счет теплопередачи, при этом теплопроводностью в проволоке можно пренебречь вследствие большой скорости ее подачи.

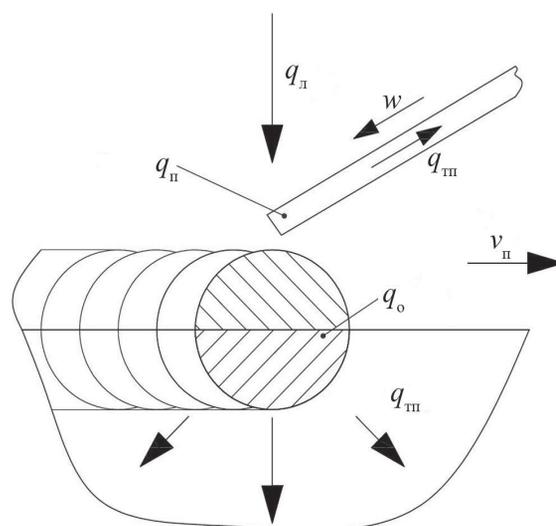


Рис. 1. Распределение энергии в процессе наплавки

Мощность электронного луча определяется как

$$q_{\text{л}} = UI_{\text{л}},$$

где U — ускоряющее напряжение, $U = 60$ кВ; $I_{\text{л}}$ — ток луча.

Эффективная мощность луча определяется из соотношения

$$q_3 = \eta_3 UI_n,$$

где η_3 — эффективный КПД процесса, принятый равным 0,95 [5].

Эффективная мощность q_3 расходуется на нагрев и плавление металла подложки и проволоки и нагрев подложки за счет теплопередачи:

$$q_3 = q_n + q_o + q_{mn},$$

где q_n — мощность, которую необходимо затратить для плавления проволоки; q_o — мощность, необходимая для проплавления основы; q_{mn} — мощность, затрачиваемая на нагрев подложки вследствие теплопередачи.

Потери мощности электронного пучка на нагрев подложки (основы) учитываются термическим КПД η_m , таким образом мощность затрачивается на плавление основного и присадочного материалов и определяется из соотношения

$$q_n + q_o = q_3 \eta_m = I_n U \eta_m \eta_3. \quad (1)$$

Мощность q_n , необходимая для расплавления проволоки с площадью сечения F и скоростью подачи w [6], составляет

$$q_n = wFS_{пл}, \quad (2)$$

где $S_{пл}$ — теплосодержание расплавленного металла,

$$S_{пл} = \rho(cT_{пл} + L_{пл});$$

$T_{пл} = 1713$ К — температура плавления материала проволоки; $L_{пл} = 272$ кДж/кг, $c = 500$ Дж/кг·К — удельные теплота плавления и теплоемкость; $\rho = 8000$ кг/м³ — плотность металла.

Мощность q_o , потраченная на плавление металла основы площадью сечения F_o и скоростью перемещения (наплавки) V_n , определяется как

$$q_o = V_n F_o S_{пл}, \quad (3)$$

где V_n — скорость перемещения пушки; F_o — площадь проплавления подложки.

Из (1) получим выражение для определения силы тока луча:

$$I_n = \frac{q_n + q_o}{U \eta_3 \eta_m}.$$

Таким образом, зная силу тока луча, можно получить мощность, затрачиваемую для наплавки проволоки на подложку.

Термический КПД зависит от множества факторов: скорости процесса, параметров источника теплоты, теплофизических свойств материала и на практике определяется экспериментально, поэтому были проведены эксперименты по наплавке проволоки диаметром 1,2 мм из коррозионностойкой аустенитной стали 316L на подложку из такого же материала при двух скоростях перемещения пушки. Наплавку проводили на электронно-лучевой установке с внутрикамерной пушкой с ускоряющим напряжением 60 кВ. Схема процесса изображена на рис. 2. Использована кольцевая развертка луча для подогрева материала подложки при радиусе развертки 2 мм и частоте развертки 500 Гц. После наплавки из полученных образцов изготавливали шлифы, по которым оценивали площади наплавленного металла и проплавления подложки, а также структуру и твердость наплавленных валиков (рис. 3 — 6).

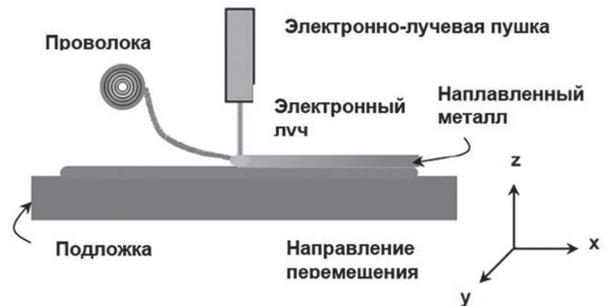


Рис. 2. Схема наплавки металла

Режимы наплавки и геометрия полученных валиков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры процессов наплавки

Номер эксперимента	I , мА	F_o , мм ²	$F_{нап}$, мм ²	V_n , мм/мин	Количество валиков
1	25	7	11,2	170	1
2	25	4,17	6,15	340	1
3, 1	25	4,17	6,15	340	2
3, 2	25	4,44	6,15	340	

Примечание: I — ток электронного луча; F_o — площадь поперечного сечения проплавленного металла основы; $F_{нап}$ — площадь поперечного сечения наплавленного металла; V_n — скорость перемещения при наплавке. Площадь наплавленного металла $F_{нап}$ (расплавленной проволоки) принята такой же, как и в эксперименте № 2, так как режим остался неизменным. Следовательно, зная количество наплавленного металла и площадь валика, можно рассчитать площадь проплавления подложки F_o .

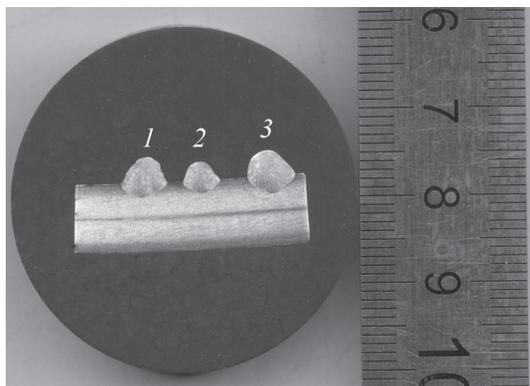
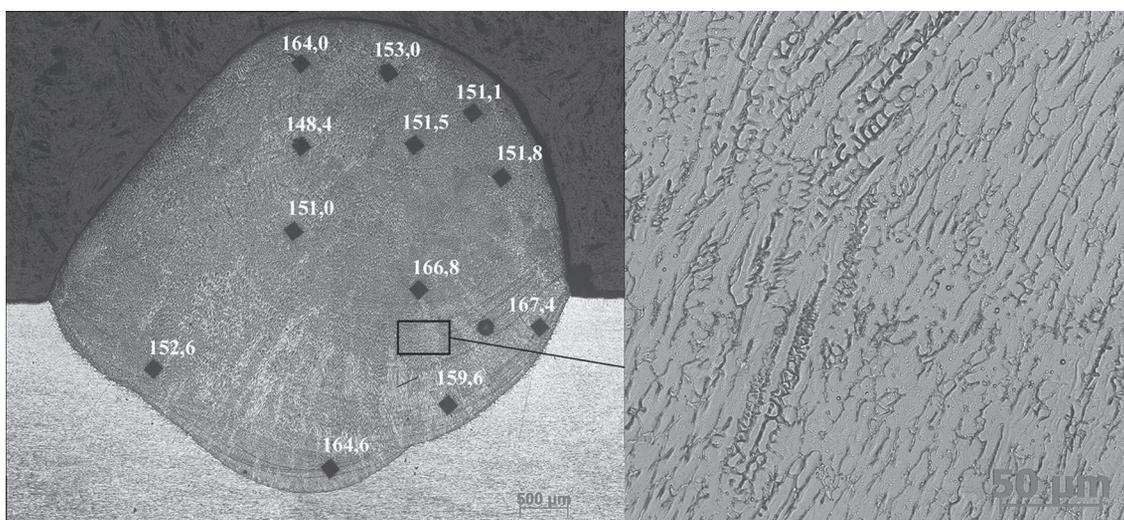


Рис. 3. Поперечный макрошлиф наплавленного металла:

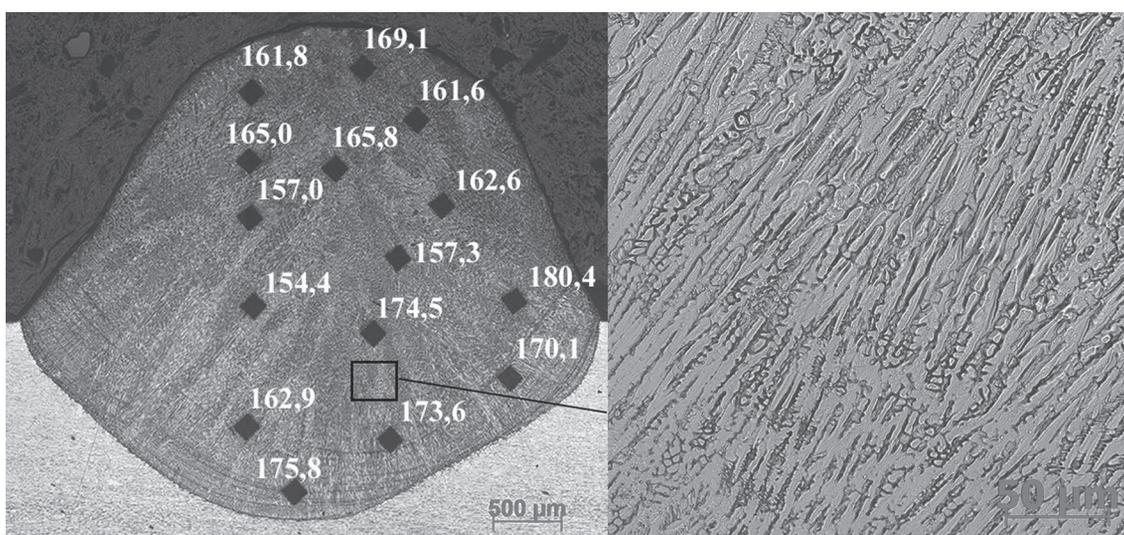
1—3 — номера наплавленных валиков



a

б

Рис. 4. Макроструктура (*a*) и микроструктура (*б*) наплавленного валика № 1 со значениями твердости HV5 в контрольных точках



a

б

Рис. 5. Макроструктура (*a*) и микроструктура (*б*) наплавленного валика № 2 со значениями твердости HV5 в контрольных точках

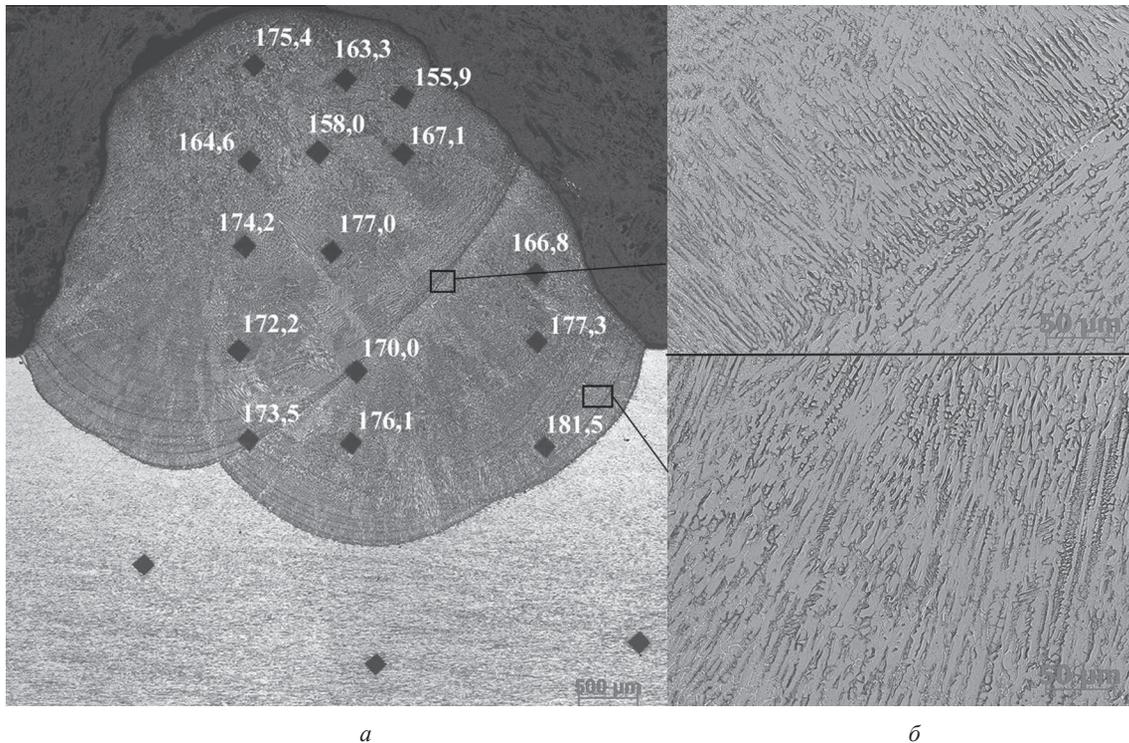


Рис. 6. Макроструктура (а) и микроструктура (б) наплавленного двойного валика № 3 со значениями твердости HV5 в контрольных точках

Зная площади поперечного сечения наплавленного металла $F_{\text{нап}}$ и проплавленного металла основы F_o , можно рассчитать термический КПД процесса по формуле, учитывая, что остальная мощность идет на нагрев основы вследствие теплопередачи:

$$\eta_t = \frac{q_o + q_{\text{п}}}{q_s},$$

где q_o — мощность пучка, затрачиваемая на проплавление металла основы и вычисляемая по (3); $q_{\text{п}}$ — мощность пучка, затраченная на плавление проволоки.

Мощность луча $q_{\text{п}}$ можно найти, зная площадь наплавленного металла:

$$q_{\text{п}} = V_{\text{п}} F_{\text{нап}} S_{\text{пл}}. \quad (4)$$

Удельный объем $V_{\text{п}} F_{\text{нап}}$, наплаваемый в единицу времени на подложку, равен удельному объему wF расплавляемой в единицу времени проволоки, поэтому расчеты по (2) и (4) можно считать эквивалентными.

Полученные значения термического КПД для экспериментов показаны в табл. 2.

Таблица 2

Значения термического КПД

Номер эксперимента	η_t
1	0,272
2	0,309
3*	0,317

* КПД рассчитан по верхнему (второму) наплавленному валику.

Для анализа микроструктуры и характера изменения твердости сделан поперечный разрез наплавленных валиков и подготовлен макрошлиф (см. рис. 3).

При исследовании структуры наплавленного металла установили, что с увеличением скорости наплавки уменьшается размер дендритных зерен вследствие увеличения скорости охлаждения валика. Твердость HV5 измерялась под нагрузкой вдавливания 5 кг на приборе Wolpert Wilson Instruments 432SVD. Значения твердости указаны в точках на рис. 4 — 6. Характер изменения твердости по высоте валиков представлен на рис. 7, за нулевую отметку высоты принята условная линия, разделяющая объемы проплавленного и наплавленного металлов.

Из графика на рис. 7 видно, что значение твердости убывает по направлению возрастания высоты валика. Значение твердости зависит от параметров источника теплоты, скорости перемещения источника теплоты (наплавки) и теплофизических особенностей материала. При неизменных параметрах источника основным фактором, влияющим на механические свойства и микроструктуру, является скорость наплавки, которая определяет скорость кристаллизации расплавленного металла. Чем выше скорость наплавки, тем выше скорость кристаллизации валиков за счет отведения тепла в материал подложки. Возрастание твердости ближе к корню валика объясняется более высоким температурным градиентом, чем в вершине.

Сравнивая микроструктуру наплавленного металла в экспериментах № 1 и 2 (см. рис. 4, 5), можно заметить, что при увеличении скорости перемещения источника

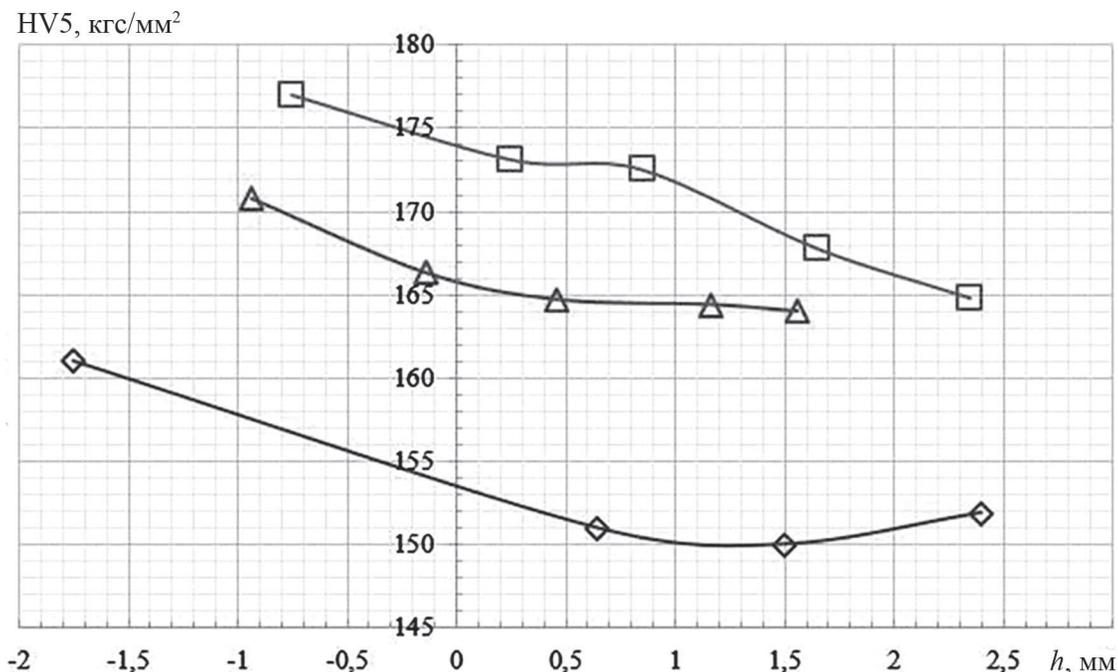


Рис. 7. Распределение средней твердости по высоте валиков: эксперименты № 1(◇), 2(Δ), 3(□)

уменьшается размер дендритных зерен, что сказывается на значении твердости. При этом в третьем эксперименте при наплавке второго валика наблюдается более высокая твердость металла (см. рис. 7), чем во втором эксперименте, несмотря на одинаковый режим наплавки.

Выводы

Предложена расчетная методика определения основных параметров режимов послойной наплавки проволоки для электронно-лучевых аддитивных технологий, предполагающих использование проволоки в качестве сырьевого материала.

Результаты проведенных экспериментов показали, что термический КПД процесса зависит от скорости наплавки, что также характерно и для сварочных процессов. При наплавке стали 316L термический КПД составляет 0,27 для скорости $V_n = 170$ мм/мин и 0,31 для $V_n = 340$ мм/мин. Термический КПД можно повысить, меняя параметры развертки электронного луча.

Твердость валиков увеличивается при увеличении скорости наплавки, что связано с увеличением скорости кристаллизации расплава и образованием более мелкозернистой структуры.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 17-79-20015).

Литература

1. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. М.: НАМИ, 2015.
2. Tamingер К.М.В., Hafley R.A. Characterization of 2219 Aluminum Produced by Electron Beam Freeform

Fabrication // Proc. 13th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas at Austin, 2002.

3. **Monitoring** and Control of Robotized Laser Metal-Wire Deposition. Göteborg: Almir Heralić, 2012.

4. Wang L. e.a. Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Deposits of AISI 316L Stainless Steel // Proc. Intern. Mech. Eng. Congress & Exposition. Denver, 2011.

5. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. М.: Изд-во МЭИ, 1998.

6. Коновалов А.В. и др. Теория сварочных процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.

References

1. Zlenko M.A., Nagajtsev M.V., Dovbysh V.M. Additivnye Tekhnologii v Mashinostroenii. M.: NAMI, 2015. (in Russian).

2. Tamingер K.M.V., Hafley R.A. Characterization of 2219 Aluminum Produced by Electron Beam Freeform Fabrication // Proc. 13th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas at Austin, 2002.

3. **Monitoring** and Control of Robotized Laser Metal-Wire Deposition. Göteborg: Almir Heralić, 2012.

4. Wang L. e.a. Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Deposits of Aisi 316L Stainless Steel // Proc. Intern. Mech. Eng. Congress & Exposition. Denver, 2011.

5. Zuev I.V. Obrabotka Materialov Kонтсентрированными Потокaми Энергии. M.: Izd-vo MPEI, 1998. (in Russian).

6. Konovalov A.V. i dr. Teoriya Svarochnykh Protssessov. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2007. (in Russian).

Сведения об авторах

Гуденко Александр Викторович — инженер, студент кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ», e-mail: alexsguddy@gmail.com

Драгунов Виктор Карпович — доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии металлов, проректор по научной работе НИУ «МЭИ», e-mail: DragunovVK@mpei.ru

Слива Андрей Петрович — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ», e-mail: SlivaAP@mpei.ru

Information about authors

Gudenko Aleksandr V. — Engineer, Student of Metal Technology Dept., NRU MPEI, e-mail: alexsguddy@gmail.com

Dragunov Viktor K. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Metal Technology Dept., Deputy Rector for Scientific Work, NRU MPEI, e-mail: DragunovVK@mpei.ru

Sliva Andrey P. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Metal Technology Dept., NRU MPEI, e-mail: SlivaAP@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 20.12.2016