

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.791
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>

Поступила в редакцию 16.10.2017
Received 16.10.2017

В. Г. Залесский, И. Л. Поболь, А. А. Бакиновский, А. Д. Губко

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. Представлена общая информация о развитии аддитивных технологий, а также обзор основных принципиальных схем процессов послойного выращивания металлических изделий. Описаны технологии и оборудование электронно-лучевого послойного получения металлических изделий как из проволоки, так и из порошка. Приведены экспериментальные данные, полученные авторами в результате электронно-лучевого аддитивного изготовления образцов из низкоуглеродистой стали, нержавеющей аустенитной стали и технического титана. Получены зависимости геометрических параметров наплавляемого слоя от основных параметров электронного луча, а также схема изменения профиля одиночного слоя наплавки от тока луча. Проведен анализ микроструктур. Описаны основные характерные зоны, образующиеся в образцах, полученных данным методом. Показано, что при работе с нержавеющей сталью типичная микроструктура образцов – крупные дендриты с главными осями длиной до нескольких миллиметров в направлении теплоотвода. Однако было замечено, что в участках, претерпевших повторный многократный переплав во время наплавки последующих слоев металла, происходит рекристаллизация и образуются равноосные зерна. В технически чистом титане помимо характерной крупнозернистой (до нескольких миллиметров в диаметре) структуры существуют зоны, где наблюдается пластинчатая структура с колониями около 1 мм, а также зона в виде полосы шириной около 1 мм вдоль стенок, представляющая собой игольчатую структуру. Это, очевидно, связано с режимом охлаждения, так как характер теплоотвода по краям заготовки отличается от центральных зон. Проведен анализ перспектив развития электронно-лучевых аддитивных технологий. Продемонстрированы примеры использования электронно-лучевой аддитивной технологии в современном производстве ускорительной техники, авиа- и машиностроении.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электронно-лучевые технологии, микроструктура, титан, нержавеющая сталь

Для цитирования. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий / В. Г. Залесский [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 169–180. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>

V. G. Zaleski, I. L. Pobol, A. A. Bakinouski, A. D. Gubko

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

METAL PARTS MANUFACTURING BY ELECTRON BEAM ADDITIVE TECHNOLOGIES

Abstract. General information about development of additive technologies, as well as an overview of the main schematics of layer by layer manufacturing of metal products is presented. The technologies and equipment for electron beam layer-by-layer production of metal products using wire and powder as a raw material is described. Experimental data obtained by the authors as a result of electron beam additive manufacturing of low-carbon steel, stainless austenitic steel and technical titanium samples are described. Relations between the product geometry and the electron beam main parameters are obtained. The analysis of microstructures is carried out. The main zones formed in the samples fabricated by this method are described. It is shown that typical microstructure of stainless steel samples consists of the large dendrites with main axes up to a few millimeters in the direction of heat sink. In a pure titanium, in addition to the characteristic coarse-grained (up to several millimeters in diameter) structure, there are zones where a lamellar structure with colonies of about 1 mm is observed, as well as a zone in the form of a strip about 1 mm wide along the walls, which is an acicular structure. This is obviously related to the cooling mode, since the character of the heat sink along the edges of the sample differs from the central zones. The analysis of electron beam additive technologies prospects is carried out. Examples of electron beam additive technology using in modern fabrication of accelerator technics, aircraft and machine building are demonstrated.

Keywords: additive technologies, electron beam technologies, microstructure, titan, stainless steel

For citation. Zaleski V. G., Pobol I. L., Bakinouski A. A., Gubko A. D. Metal parts manufacturing by electron beam additive technologies. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 169–180 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>

Введение. Традиционные методы получения деталей сложной формы (например, механическая обработка точением и фрезерованием), хотя и остаются массовыми, но являются материало- и энергозатратными, что обуславливает стремление развивать новые технологии формирования изделий. Широкое распространение методов, позволяющих изменять свойства изделия за счет добавления дополнительных слоев материала (наплавка, нанесение покрытий различного функционального назначения с применением концентрированных потоков энергии), обеспечило расширение функциональных возможностей деталей и инструмента.

Развитие металлургии, электроники, робототехники, информационных технологий, а также достижения в области лазерных и электронно-лучевых технологий в последние десятилетия позволили перейти от модифицирования и восстановления поверхности изделия к его «прямому» изготовлению – так называемым аддитивным технологиям. Указанные технологии представляют собой послойное построение заготовок или готовых изделий путем последовательного соединения между собой слоев одного и того же или разных материалов наплавкой, спеканием или синтезом с использованием компьютерной модели [1].

Специфика аддитивного метода позволяет создавать изделия сложнейшей формы, в том числе и те, которые невозможно получить другими методами, из полимеров, металлов, различных композиционных и керамических материалов. Исследование особенностей аддитивных технологий для изготовления металлических деталей на данный момент является актуальной научно-технической задачей, так как для большинства деталей и инструмента необходим определенный уровень механических свойств, который пока не может быть обеспечен у изделий, полученных послойно [2]. Аддитивные технологии находятся еще в самом начале своего развития, а поэтому представляют собой обширную сферу неисследованных материалов и технологических приемов. В данной работе представлен взгляд на перспективы электронно-лучевых аддитивных технологий, а также некоторые результаты экспериментальных исследований в этой области, полученные авторами.

Разновидности аддитивных технологий. Существует два принципиально различных способа получения изделий с применением аддитивных технологий [3]. Первый (послойное осаждение – Bed Deposition) заключается в спекании или сплавлении последовательно по одному слою материала (обычно порошка), который находится в специальной ванне. Инструмент, обеспечивающий подвод энергии (лазер, электрическая дуга или электронный луч), разделенный в пространстве с рабочим материалом, выполняет перемещения по заданной траектории в плоскости, тем самым обеспечивая формирование изделия требуемой формы с высокой точностью. Примерами таких технологий служат лазерное сплавление (Selective Laser Melting – SLM) и электронно-лучевое сплавление (Electron Beam Melting – EBM). Второй способ отличается совмещением источника энергии и устройства, подающего рабочий материал (порошок или проволока) в единый исполнительный механизм (прямое осаждение – Direct Deposition). На данном принципе основан ряд технологий: построение произвольных форм с применением электронного луча (Electron Beam Free Form Fabrication – EBFFF), выращивание изделий осаждением металла (Shape Metal Deposition – SMD), аддитивная электродуговая технология с подачей проволоки (Wire and Arc Additive Manufacturing – WAAM) и др.

Многие аддитивные технологии имеют небольшую рабочую область построения (табл. 1), что в значительной степени ограничивает их применение. В то же время электронно-лучевая технология EBFFF лидирует по этому параметру и позволяет изготавливать изделия размерами до нескольких метров [4].

Таблица 1. Сравнение некоторых характеристик оборудования для различных аддитивных технологий [4]

Table 1. Comparison of some characteristics of equipment for various additive technologies [4]

Наименование оборудования	Технология	Тип материала	Рабочее пространство (длина/ширина/высота), мм
EBAM 300 Series (Sciaky)	Electron Beam Additive Manufacturing	Металл	6096 × 1397 × 1371
VX4000 (Voxeljet)	Sand Casting	Разнородный	3987 × 1981 × 990
Objet 1000 (Stratasys)	Polyjet	Пластик	990 × 787 × 482

Окончание табл. 1

Наименование оборудования	Технология	Тип материала	Рабочее пространство (длина/ширина/высота), мм
Lens 850-R (Optomec)	Laser	Металл	889 × 1498 × 889
Projet 5000 (3D Systems)	Multijet Printing Process	Пластик	533 × 381 × 279
M400 (EOS)	Selective Laser Melting	Металл	381 × 381 × 381
Arcam Q20 (Arcam)	Electron Beam Melting	Металл	330 × 381

Технология ЕВМ. Технология, использующая металлический порошок как строительный материал и электронный луч в качестве источника энергии, имеет обозначение ЕВМ и запатентована компанией ARCAM (Швеция). На рис. 1 представлена схема расположения элементов в камере для электронно-лучевого сплавления [5]. Порошковая ванна создается путем разравнивания порошка, находящегося в бункерах, специальной рейкой в рабочей зоне, которая располагается на платформе. Источник энергии (электронный луч) оплавляет участки поверхности каждого слоя согласно заданной геометрии. После сплавления слоя оставшийся порошок убирают с рабочей области, платформа с изделием опускается на высоту одного слоя порошка и процесс повторяется снова до создания прочного трехмерного компонента.

Представители компании ARCAM заявляют, что разработанная ими технология позволяет изготавливать металлические детали, обладающие более высокой плотностью, чем изделия, полученные лазерными машинами [6]. Скорость печати при использовании электронного луча в качестве источника энергии больше в 3–4 раза, чем при других аналогичных технологиях. Практически полная геометрическая свобода, характерная для «порошковых» аддитивных технологий, позволяет инженерам разрабатывать новые формы для будущих деталей без производственных ограничений. Это дает возможность изготавливать экстремально легкие конструкции, уменьшать количество деталей в узлах или путем искусственного повышения шероховатости поверхности обеспечивать ортопедическому имплантату максимальную скорость сращения с тканями. В процессе работы установки производства Arcam используется электронный луч, который управляется электромагнитными катушками, обеспечивающими чрезвычайно быстрое и точное его перемещение, что позволяет поддерживать несколько отдельных ванн расплава одновременно. Механические свойства получаемых изделий выше, чем у отливки, и сопоставимы с деформированным материалом (табл. 2) [7].

Вакуумная система обеспечивает остаточное давление в рабочей камере $1 \cdot 10^{-5}$ бар или ниже на протяжении всего цикла. Во время фактического процесса плавления в камеру вводится гелий и давление повышается до $2 \cdot 10^{-3}$ бар. Контролируемая таким образом среда важна для обеспечения неизменности химического состава «строительного» материала.

Перед сплавлением каждый слой порошка подвергается электронно-лучевому нагреву до оптимальной температуры, специально подобранной для конкретного материала, в целях предотвращения удаления мелких фракций порошка при сплавлении. В результате детали, полученные с помощью процесса ЕВМ, свободны от остаточных напряжений и позволяют получать микроструктуру без мартенситных включений [8].

Минусом данной технологии является необходимость наличия вспомогательного оборудования для безопасной работы с использованным мелкодисперсным металличе-

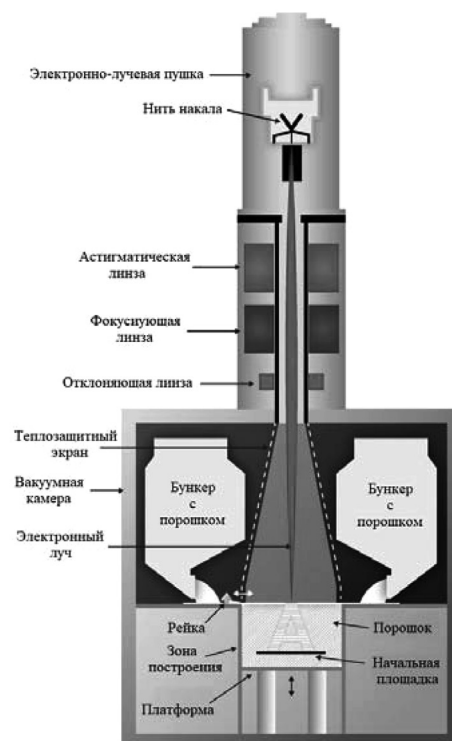


Рис. 1. Схема расположения элементов установки для электронно-лучевого сплавления [5]

Fig. 1. The layout of the elements of the EBM equipment [5]

ским порошком: взрывозащищенных пылесосов, тележек для обработки порошка и системы восстановления порошка. Системы для извлечения порошка включают интегрированное просеивание и повторное наполнение контейнеров, что позволяет перерабатывать весь несплавленный порошок с минимальным ручным вмешательством [9].

Таблица 2. Сравнение механических свойств образцов из сплава Ti6Al4V, изготовленных разными технологиями [7]

Table 2. Comparison of mechanical properties of Ti6Al4V alloy samples manufactured by different technologies [7]

Механический параметр образца	Ti6Al4V, изготовленный по технологии EBM	Ti6Al4V литой (согласно ASTM F1108)	Ti6Al4V деформированный (согласно ASTM F1472)
Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	950 МПа	758 МПа	860 МПа
Пределная прочность на разрыв, σ_B	1020 МПа	860 МПа	930 МПа
Относительное удлинение	14 %	>8%	>10%
Предел выносливости при 600 МПа	> 10 000 000 циклов	–	–
Твердость	33 HRC	–	–
Модуль упругости	120 ГПа	–	–

Порошковая аддитивная электронно-лучевая технология получила особенно широкое применение в медицине. Технология EBM позволяет изготавливать так называемые кастомизированные медицинские имплантаты (рис. 2, *a, b*) для конкретного пациента, существенно сокращая время проектирования и производства, а использование вакуума выгодно выделяет данную технологию из числа других при работе с титаном и его сплавами. Однако этот метод получения изделий находит применение и в других сферах, где важно уменьшить массу уникальной детали. Примером является изготовление корпуса коробки передач гоночного автомобиля (рис. 2, *c*) [7].

Технология EBFFF. Использование проволоки как «строительного» материала не только ускоряет и удешевляет процесс, но и позволяет получать изделия крупных размеров. Однако каче-

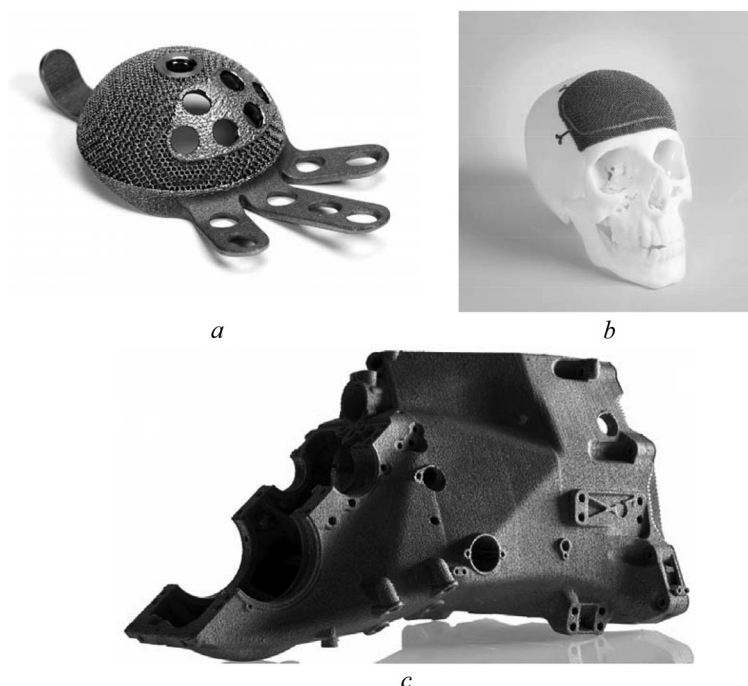


Рис. 2. Примеры применения технологии EBM: медицинские имплантаты (*a, b*), корпус коробки передач гоночного болида (*c*) [7]

Fig. 2. Examples of the use of EBM technology: medical implants (*a, b*), transmission case of a racing car (*c*) [7]

ство поверхности при этом заметно ниже, чем при использовании порошка, поэтому необходима последующая механическая обработка выращенной заготовки.

На рис. 3 представлена схема реализации технологии EBFFF выращивания изделий с применением электронного луча, который обеспечивает расплавление материала проволоки и его сплавление с подложкой и с предыдущим слоем. Подача проволоки осуществляется с помощью специального механизма. На основе компьютерной модели изделия путем согласованной работы электронной пушки, систем перемещения пушки, рабочего стола и подачи проволоки послойно формируется изделие заданной формы.

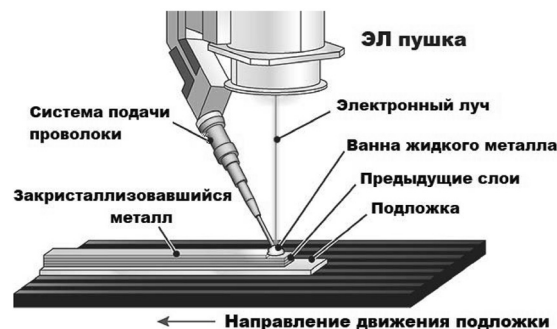


Рис. 3. Схема процесса типа Direct Deposition на примере технологии Electron Beam Free Form Fabrication [10]

Fig. 3. Scheme of the Direct Deposition process using Electron Beam Free Form Fabrication as example [10]

Пример оборудования для послойной электронно-лучевой наплавки представлен на рис. 4. Известный производитель оборудования для электронно-лучевой сварки компания Sciaky (США) в последнее десятилетие активно развивает направление аддитивного производства. Такой способ обеспечивает высокую скорость выращивания изделий при низкой стоимости и доступности материала по сравнению с порошком, позволяет получать изделия больших размеров, ограниченных только размерами вакуумной камеры. Данная технология находит применение в авиации, судостроении и военной промышленности (рис. 5). Подтверждением перспективности технологии электронно-лучевой послойной наплавки является то, что компания Sciaky поставляет свое оборудование для Lockheed Martin Corporation – крупнейшего в мире производителя в сфере ВПК.

Развитие электронно-лучевых аддитивных технологий в Физико-техническом институте НАН Беларуси. Активное освоение современного электронно-лучевого оборудования (рис. 6), позволяющего проводить не только сварку, но и процессы наплавки и обработки материалов, осуществлялось поэтапно в Физико-техническом институте НАН Беларуси.

Исследование влияния тока электронного луча на геометрию наплавки. На первом этапе после модернизации электронно-лучевой установки путем установки в камеру системы подачи проволоки проводились эксперименты, целью которых было получение данных о зависимости геометрии наплавки от основных параметров электронного луча. Для этого использовалась сварочная низкоуглеродистая проволока СВ-08Г2С (Ø1,2 мм), которую послойно наплавляли на подложку из стали 45.

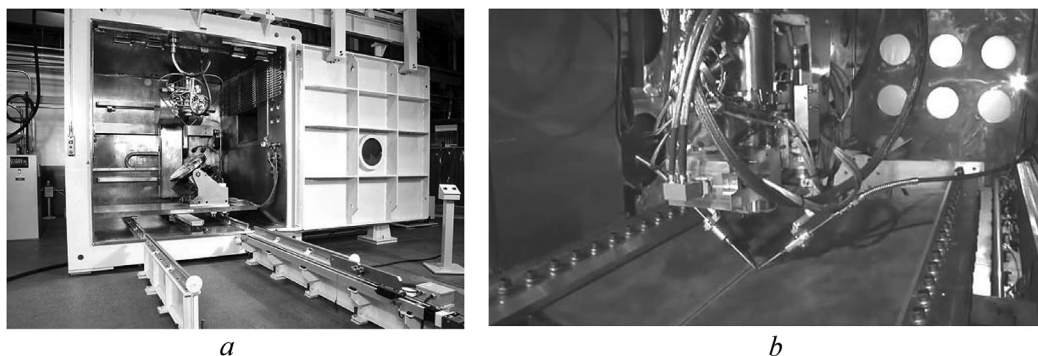


Рис. 4. Установка EBAM 300 Series компании Sciaky для изготовления заготовок методом EBFFF: внешний вид камеры (a) и электронно-лучевая пушка с системами подачи проволоки (b) [11]

Fig. 4. Sciaky's EBAM 300 Series for EBFFF process: camera (a) and electron beam gun with wire feed systems (b) [11]



Рис. 5. Примеры применения технологии EBFFF: топливный бак субмарины из титанового сплава Ti6Al4V в процессе изготовления (a) и в готовом виде (b) [12]; лонжерон Airbus, напечатанный из титанового сплава с помощью процесса EBAM Sciaky в виде заготовки (c) и после обработки (d) [13]; винт из нержавеющей стали (e) [14]; заготовка детали ускорительной техники из сверхчистого ниобия (f) [15]

Fig. 5. Examples of EBFFF technology application: a fuel tank of the submarine made of Ti6Al4V alloy in the manufacturing process (a) and ready-made (b) [12]; an Airbus spar printed using the EBAM Sciaky process in the form without (c) and after processing (d) [13]; a screw made of stainless steel (e) [14]; a detail of accelerator from ultrapure niobium (f) [15]



Рис. 6. Электронно-лучевое оборудование с габаритами камеры $3000 \times 3000 \times 4500$ мм и мощностью электронного луча до 30 кВт (a); пушка, размещенная в портале (b)

Fig. 6. Electron beam equipment with a camera size of $3000 \times 3000 \times 4500$ mm and electron beam power of up to 30 kW (a); electron beam gun on the gantry (b)

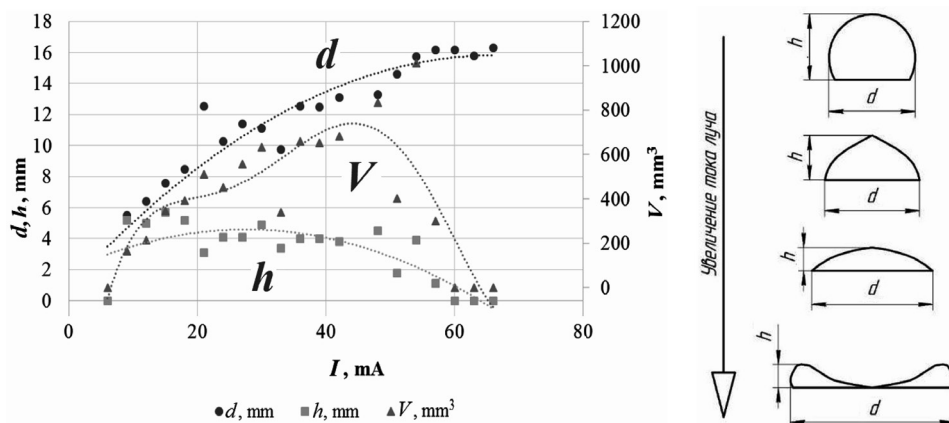


Рис. 7. Зависимость высоты h , ширины d и объема V валика наплавленного слоя от тока луча I и схема изменения профиля одиночного валика в слое при различной силе тока луча [5]

Fig. 7. Dependence of the bead height h , width d , volume V on the beam current I and the scheme of a single bead profile changing with different beam currents [16]

На рис. 7 показаны экспериментальные зависимости геометрических параметров сечения валика расплава в слое от тока электронного луча, из которых видно, что существует возможность управления отношением ширины и высоты наплавленного слоя, применяя варьирование тока (то есть мощность) при постоянном значении остальных параметров. Кроме того, можно сделать вывод, что при постоянных значениях всех параметров процесса существует довольно большой интервал изменения тока электронного луча (40–50 мА), которым можно оперировать без опасности образования макродефектов. Очевидно, что выбор оптимальных параметров электронного луча для получения валика заданной формы необходим для увеличения точности изготовления и, следовательно, снижения потери металла при последующей механической обработке.

При выборе параметров электронного луча необходимо также учитывать, что в процессе послойной наплавки тепловые условия расплавления и последующей кристаллизации металла изменяются вследствие накопления тепла в заготовке. Этот фактор имеет наиболее существенное значение при создании тонкостенных участков изделия.

При работе с отличающимися по составу материала проволокой и подложкой подтверждено, что представленный способ позволяет получать заготовки с градиентом химического состава и свойств материала в направлении, перпендикулярном подложке, путем подбора материалов проволоки и подложки. Получение таким образом градиентных материалов возможно благодаря физическому перемешиванию металлов проволоки и подложки, которое происходит в ванне, образованной электронно-лучевым воздействием при выращивании первого слоя. При наплавке следующего слоя металл проволоки перемешивается уже с металлом первого наплавленного слоя и т. д. В результате в каждом последующем слое содержание легирующих элементов, входящих в материал подложки, уменьшается.

Анализ микроструктуры образцов, изготовленных методом послойной электронно-лучевой наплавки. Следующим этапом стала работа с нержавеющей сталью аустенитного класса, широко применяемой в промышленности и вместе с тем имеющей довольно высокую стоимость, что делает этот материал перспективным для аддитивных технологий. Был изготовлен опытный образец из проволоки LNM 304LSI (США) на подложке из стали 12Х18Н10Т в форме восьмигранной трубы. Толщина стенки – 10 мм, высота – 50 мм, количество слоев – 40, время выращивания – 1 ч (рис. 8, а). На рис. 8, б показан участок после механической обработки двух граней заготовки.

Типичная микроструктура материала образцов, полученных таким методом, – крупные дендриты с главными осями длиной до нескольких миллиметров в направлении теплоотвода (рис. 9, а). Неравномерное распределение легирующих элементов, характерное для дендритного строения, не позволяет получать свойства, сравнимые с показателями деталей, изготовленных из деформированных материалов. Послойное выращивание изделий из нержавеющей стали может сопровождаться межкристаллитной коррозией вследствие обеднения хромом приграничных зон.



Рис. 8. Участок восьмигранной трубы, выращенный с применением электронного луча из проволоки LNM 304LSI на подложке из стали 12X18H10T до (a) и после (b) механической обработки
 Fig. 8. Octagonal-pipe section made using an electron beam from a LNM 304LSI wire on a 12Cr18Ni10Ti steel substrate before (a) and after (b) machining

В ходе эксперимента замечено, что в участках, претерпевших повторный многократный переплав во время наплавки последующих слоев металла, происходит рекристаллизация и образуются равноосные зерна (рис. 9, b).

Кроме того, проводились работы и с технически чистыми металлами, например титаном марки ВТ1-0 (использовалась проволока Ø1,2 мм). Изготовлены тонкостенные образцы со следующими геометрическими параметрами: высота стенки – 110 мм, длина – 100 мм, толщина стенки – 8 мм. Образец выращен за 30 проходов (рис. 10, a, b).

Эксперименты показали, что при послойной наплавке возможно смещать каждый последующий слой металла на 1/3 своей толщины в горизонтальной плоскости. Это позволяет получать изделия сложной геометрической формы (рис. 10, c, d).

Особый интерес представляет собой анализ структуры образцов, полученных послойно, так как металл проходит множество сложных термических циклов.

На рис. 11 на экспериментальном образце, выращенном аддитивным электронно-лучевым методом из титана марки ВТ1-0, выделены зоны, которые отличаются своей структурой от остального металла образца. В зоне 1 наблюдается пластинчатая структура с колониями около 1 мм, состоящая из α-титана и тонких прослоек второй фазы (рис. 12, a), которая в техническом титане представляет собой концентрационную неоднородность, или β-фазу (присутствие β-фазы в сплаве ВТ1-0 допустимо вследствие наличия примесей).

Такой характер структуры обычно наблюдается при низких скоростях охлаждения сплава, что при электронно-лучевом нагреве может произойти в случае замедления теплоотвода в металл заготовки из-за ее высокой температуры. Температура выращиваемой заготовки увеличи-

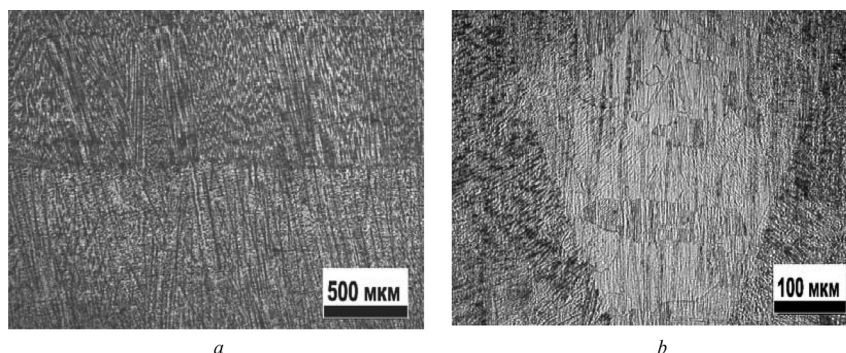


Рис. 9. Микроструктура образца, выращенного из аустенитной нержавеющей стали: зона без переплава (a) и переплавленный электронным лучом участок (b)
 Fig. 9. Microstructure of a sample fabricated from austenitic stainless steel: a zone without re-melting (a) and an electron beam-melted section (b)

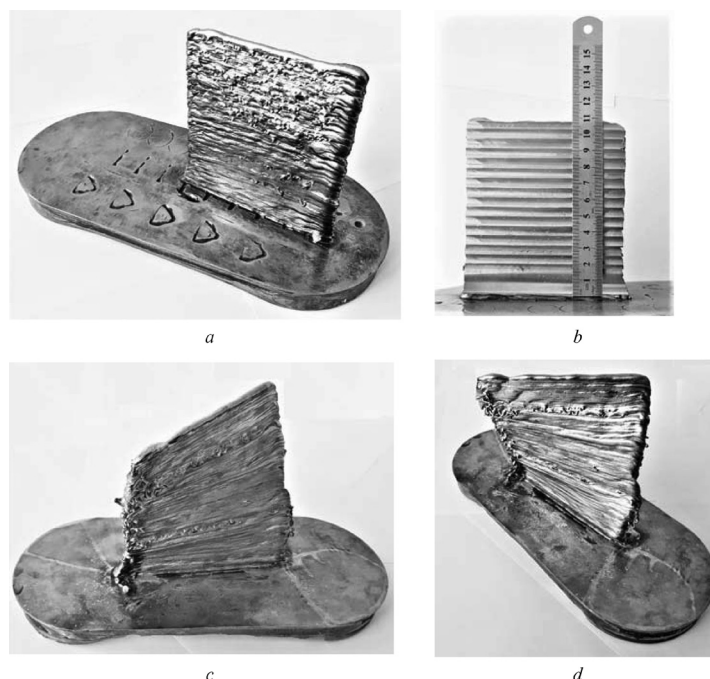


Рис. 10. Экспериментальные образцы, выращенные аддитивным электронно-лучевым методом из титана марки ВТ1-0: до (а) и после (б) механической обработки; заготовка сложной формы со смещением слоев в горизонтальной плоскости (с, d)

Fig. 10. Samples manufactured by additive electron beam method from titanium: before (a) and after (b) machining; complex shape part with layers displacement in the horizontal plane (c, d)

вается по мере наплавки слоев металла, поэтому зона с пластинчатой структурой начинается только в середине сечения заготовки. Зона 2 располагается в виде полосы шириной около 1 мм вдоль стенок и представляет собой игольчатую структуру (рис. 12, b), что, очевидно, связано с режимом охлаждения, так как характер теплоотвода по краям заготовки отличается от других зон.

Проведенный анализ показывает, что характер роста и форма зерен, полученных при выращивании образцов из разных металлов и сплавов, могут отличаться кардинальным образом.

Перспективы применения электронно-лучевых аддитивных технологий. С каждым годом продается все больше оборудования и материалов для аддитивного производства, качество получаемых изделий растет. Все это ведет к удешевлению выращенных изделий и, как следствие, к более широкому применению самой технологии в машино- и приборостроении. Представляет интерес применение проволоочных аддитивных технологий для создания массивных пресс-форм для обработки металлов давлением, литевых форм для отливки крупногабаритных пластмассовых изделий, а также катодов-мишеней со сложным химическим составом.

Как показал анализ опыта зарубежных пользователей электронно-лучевых аддитивных технологий, основными областями использования являются авиакосмическая, судостроительная, машиностроительная и энергетическая сферы, а также изготовление медицинских имплантатов. Прежде всего речь идет об изготовлении из дорогостоящих материалов мелкосерийных изделий сложной геометрической формы, получение которых с применением традиционных вычитающих технологий связано с низким коэффициентом использования материала и большими финансовыми потерями. Кроме того, реализация «прямого» производства по 3D-модели

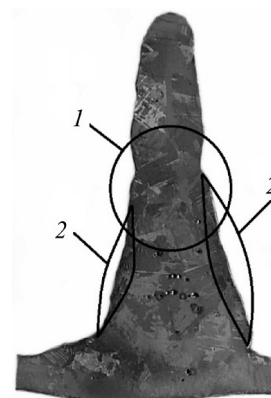


Рис. 11. Макрошлиф образца, выращенного электронно-лучевым методом из титана марки ВТ1-0 с зонами 1 (пластинчатая структура) и 2 (игольчатая структура)

Fig. 11. The large section of sample manufactured by additive electron beam method from grade 2 titanium: macrostructure with zones 1 (tabular structure) and 2 (needle structure)

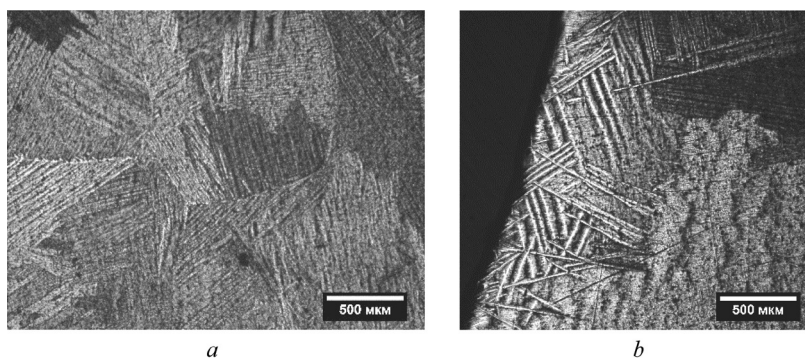


Рис. 12. Микроструктура краевой (а) и центральной зон (b) образца
 Fig. 12. The microstructure of the edge zone (a) and the central zone (b) of the sample

позволяет в несколько раз сократить временные и экономические затраты на изготовление новых изделий, а также применять такие конструкторские решения, которые невозможны при традиционных методах. Причем накопление технологического опыта способствует снижению себестоимости изделий и обеспечивает расширение области применения указанных технологий в другие сферы, в том числе и для массового производства.

Использование проволоки как исходного материала позволяет достигать высоких скоростей выращивания изделий сложной формы, получать образцы больших габаритных размеров, применять широкий спектр металлов и сплавов. Указанные преимущества обеспечивают высокую конкурентоспособность технологий послойного выращивания с использованием проволочных материалов в сравнении с порошковыми аддитивными технологиями.

Заключение. В результате проведенных авторами экспериментов получены зависимости геометрических размеров валика наплавленного слоя выращиваемого образца от мощности электронного луча, а также других параметров процесса электронно-лучевой послойной наплавки. Отработаны режимы изготовления образцов из малоуглеродистой, нержавеющей сталей и титанового сплава ВТ1-0.

Проведенный металлографический анализ образцов из указанных металлов и сплавов подтверждает возможность управления микроструктурой во время процесса выращивания заготовок. Показано, что установленные режимы послойного выращивания с применением проволочных материалов позволяют получать заготовки с отсутствием макродефектов (пор, трещин, непроплавов и других) и могут быть использованы при разработке программного обеспечения электронно-лучевого оборудования для 3D-печати.

Полученные результаты можно также рассматривать как основу для разработки технологии электронно-лучевого аддитивного производства металлических изделий.

Список использованных источников

1. Frazier, W. E. Digital Manufacturing of Metallic Components [Electronic resource] / W. E. Frazier. – Mode of access: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2010/2010-60-Frazier.pdf> – Date of access: 13 October 2017.
2. Guo, N. Additive manufacturing: technology, applications and research needs / N. Guo, M. C. Leu // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 8, № 3. – P. 215–243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
3. Pham, D. T. Rapid prototyping and rapid tooling – the key enablers for rapid manufacturing / D. T. Pham, S. S. Dimov // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: J. Mech. Eng. Sci.* – Vol. 217, № 1. – P. 1–23. <https://doi.org/10.1243/095440603762554578>
4. Ek, K. Additive Manufactured Material: Master of Science Thesis MMK 2014:19 MKN 109 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design / K. Ek. – Stockholm, Sweden, 2014. – 102 p.
5. Hardware of ARCAM electron beam melting equipment [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/> – Date of access: 13.10.2017.
6. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
7. Electron Beam Melting (EBM) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.camplax.com.au/ebm-electron-beam-melting/> – Date of access: 13.10.2017.

8. EBM[®] Electron Beam Melting in the forefront of Additive Manufacturing [Electronic resource] // Arcam EBM. – Mode of access: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/> – Date of access: 13.10.2017.
9. Powder Handling [Electronic resource] // Arcam EBM. – Mode of access: <http://www.arcam.com/technology/products/powder-handling/> – Date of access: 13.10.2017.
10. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing / W. J. Sames [et al.] // *Int. Mat. Rev.* – 2016. – Vol. 61, Iss. 5. – P. 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
11. Make Metal Parts Faster & Cheaper Than Ever with Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM[®]) Systems or Services [Electronic resource] // Sciaky Inc. – Mode of access: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology> – Date of access: 13.10.2017.
12. Arctic Submarine to Include 3D Printed Parts [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.rapidreadytech.com/2017/02/arctic-submarine-to-include-3d-printed-parts/> – Date of access: 13.10.2017.
13. Airbus to Install Sciaky Metal 3D Printer [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.additivemanufacturing.media/news/-airbus-to-install-sciaky-metal-3d-printer> – Date of access: 13.10.2017.
14. Sciaky's new lineup of EBAM systems at 3D Print UAE [Electronic resource]. – Mode of access: <https://3dfabprint.com/sciakys-new-lineup-of-ebam-systems-at-3d-print-uae/> – Date of access: 13.10.2017.
15. Benson Tolle, T. H. Accelerating Materials Insertion by Evolving the DoD Materials Qualification-Transition Paradigm / T. H. Benson Tolle, G. A. Shoepner // *Advanced Materials, Manufacturing and Testing Information Analysis Center.* – 2002. – Vol. 6, № 1. – P. 3–6.
16. Бакиновский, А. А. Исследования возможностей применения установки электронно-лучевой сварки для изготовления послойной наплавкой заготовок из металлической проволоки / А. А. Бакиновский, А. А. Бурин // *Сборник научных трудов Международной конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов»*, г. Минск, 14–16 сент. 2016 г. – Минск, 2016. – Кн. 2. – С. 15–20.

References

1. Frazier W. E. *Digital Manufacturing of Metallic Components*. Available at: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2010/2010-60-Frazier.pdf> (Accessed 13 October 2017).
2. Guo N., Leu M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 215–243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
3. Pham D. T., Dimov S. S. Rapid prototyping and rapid tooling – the key enablers for rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 217, no. 1, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1243/095440603762554578>
4. Ek K. *Additive Manufactured Material*: Master of Science Thesis MMK 2014:19 MKN 109 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design. Stockholm, Sweden, 2014. 102 p.
5. *Hardware of ARCAM electron beam melting equipment*. Available at: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/> (Accessed 13 October 2017).
6. Zlenko M. A., Nagaitsev M. V., Dovbysh V. M. *Additive technologies in mechanical engineering: a manual for engineers*. Moscow, Research Automobile and Automotive Institute Publ., 2015. 220 p. (in Russian).
7. *Electron Beam Melting (EBM)*. Available at: <http://www.camplex.com.au/ebm-electron-beam-melting/> (Accessed 13 October 2017).
8. EBM[®] Electron Beam Melting in the forefront of Additive Manufacturing. *Arcam EBM*. Available at: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/> (Accessed 13 October 2017).
9. Powder Handling. *Arcam EBM*. Available at: <http://www.arcam.com/technology/products/powder-handling/> (Accessed 13 October 2017).
10. Sames, W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, iss. 5, pp. 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
11. Make Metal Parts Faster & Cheaper Than Ever with Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM[®]) Systems or Services. *Sciaky Inc.* Available at: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology> (Accessed 13 October 2017).
12. *Arctic Submarine to Include 3D Printed Parts*. Available at: <http://www.rapidreadytech.com/2017/02/arctic-submarine-to-include-3d-printed-parts/> (Accessed 13 October 2017).
13. *Airbus to Install Sciaky Metal 3D Printer*. Available at: <https://www.additivemanufacturing.media/news/-airbus-to-install-sciaky-metal-3d-printer> (Accessed 13 October 2017).
14. *Sciaky's new lineup of EBAM systems at 3D Print UAE*. Available at: <https://3dfabprint.com/sciakys-new-lineup-of-ebam-systems-at-3d-print-uae/> (Accessed 13 October 2017).
15. Benson Tolle T. H., Shoepner G. A. Accelerating Materials Insertion by Evolving the DoD Materials Qualification-Transition Paradigm. *Advanced Materials, Manufacturing and Testing Information Analysis Center*, 2002, vol. 6, no. 1, pp. 3–6.
16. Bakinovskiy A. A., Burin A. A. Investigation of possibility of using electron beam welding equipment for layer by layer fabrication of samples from wire. *Sb. nauch. tr. Mezhdunar. konf. «Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov»*, g. Minsk, 14–16 sent. 2016 g. Kn. 2 [Book of conference “Modern methods and technologies of materials fabrication and treatment”, Minsk, 14–16 September. Book 2]. Minsk, 2016, pp. 15–20 (in Russian).

Информация об авторах

Залесский Виталий Геннадьевич – доктор физико-математических наук, директор, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.zallesski@phti.by

Поболь Игорь Леонидович – доктор технических наук, заведующий отделом электронно-лучевых технологий и физики плазмы, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pobol@phti.by

Бакиновский Андрей Александрович – научный сотрудник лаборатории электрофизики, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: backinoffskin@mail.ru

Губко Артем Дмитриевич – научный сотрудник лаборатории электрофизики, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: phti_leph@mail.ru

Information about the authors

Vitali G. Zaleski – D. Sc. (Physics and Mathematics), Director, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.zallesski@phti.by

Igor L. Pobol – D. Sc. (Engineering), Head of the Department of Plasma Physics and Electron Beam Technologies, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pobol@phti.by

Andrey A. Bakinowski – Researcher of the Laboratory of Electrophysics, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: backinoffskin@mail.ru

Artem D. Gubko – Researcher of the Laboratory of Electrophysics Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: phti_leph@mail.ru