

## ПОЛУЧЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ 3D ПЕЧАТИ\*

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, В. А. МАТВЕЙЧУК, М. О. РУСЫНИК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Отмечена перспективность изготовления широкой номенклатуры деталей и узлов летательных аппаратов и двигателей с применением электронно-лучевых технологий. В работе рассмотрены особенности создания такой технологии с использованием отечественного сырья в виде порошковых материалов, либо присадочной проволоки. На лабораторном оборудовании изготовлены цилиндрические и прямоугольные образцы, что свидетельствует о возможности реализации аддитивной технологии для нужд промышленности. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 7.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая наплавка, изделия заданной формы, метод 3D печати, порошковые материалы, присадочные проволоки, лабораторная установка

Инновационные технологии послойного производства изделий методом быстрого прототипирования открывают новые возможности для изготовления деталей заданной формы и структуры с заранее прогнозируемыми свойствами.

Процесс производства изделий таким методом с применением электронного луча относительно новый, но уже успешно показавший большие перспективы своего использования в промышленности для изготовления широкой номенклатуры как деталей и узлов летательных аппаратов, так и газотурбинных двигателей. В его основу положена операция послойного сплавления металлического порошка или присадочной проволоки в вакууме с помощью электронного луча. Этот подход отличает быстрый переход к изготовлению трехмерных изделий непосредственно от системы автоматизированного проектирования с возможностью использования широкого спектра металлов и сплавов, в том числе тугоплавких и химически активных. Все существующие на сегодня промышленные разработки принадлежат зарубежным компаниям [1]. Использование технологий и машин для прототипирования в нашей стране связано с их покупкой за рубежом с последующими значительными затратами на приобретение необходимых порошков [2], которые являются расходным и дорогостоящим компонентом этой технологии.

Целью настоящей работы является создание аддитивных технологий производства изделий заданной формы и структуры методами послойного электронно-лучевого сплавления металлов в

вакууме с применением порошковых материалов Electron Beam Melting (EBM) и присадочной проволоки Direct Manufacturing (DM), изготавливаемых в Украине.

Для этого необходимо:

- провести исследование свойств и возможности применения металлических порошков и присадочных проволок для реализации аддитивного процесса изготовления и ремонта изделий авиакосмической промышленности, турбиностроения, машиностроения и медицины;

- разработать конструкторскую документацию на основные узлы 3D принтера для каждого из исследуемых аддитивных процессов и изготовить экспериментальное лабораторное оборудование;

- разработать программное обеспечение для проведения исследований двух аддитивных процессов с использованием электронного луча (EBM и DM) [3];

- разработать аддитивные электронно-лучевые технологии EBM и DM, а также исследовать свойства многослойного наплавленного металла;

- создать промышленный макет оборудования в комплекте с программным обеспечением применительно к промышленности Украины.

**Актуальность работы:** разрабатываемые технологии и оборудование позволят производить металлические изделия методом быстрого прототипирования с использованием отечественного сырья.

Создаваемые технологии и оборудование изначально ориентированы на потребности отечественных предприятий. Для производства предполагается применять необходимое производителю недорогое отечественное сырье. Этот подход обеспечит возможность изготовления деталей и узлов методом быстрого прототипирования, исходя из

\* По материалам доклада на VIII Международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов». 10–16 сентября 2017 г., Одесса.

нужд потребителя и в тесном контакте с ним. Разрабатываемые технологии позволят снизить сроки внедрения новых видов продукции, расширить ее ассортимент, а также создавать принципиально новые виды изделий с заранее прогнозируемыми свойствами, производство которых невозможно без применения методов 3D печати.

Поскольку установок отечественной разработки для 3D печати не существует, актуально создание в Украине оборудования и программного обеспечения к нему для реализации аддитивного электронно-лучевого производства, свободного от импортного сырья, ориентированного на внедрение на предприятиях авиакосмической промышленности и турбиностроения: ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», ГП «ЛРЗ «Мотор», АО «Мотор Сич» и ГП «КБ «Южное».

**Технология послойного электронно-лучевого сплавления металлов в вакууме с применением порошковых материалов ЕВМ.** Технология электронно-лучевой наплавки ЕВМ подобна применяемой в промышленности селективной лазерной наплавке. Главное отличие заключается в использовании электронной пушки вместо лазера в качестве источника энергии для плавки. В основе технологии лежит использование пучка электронов высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели. В отличие от технологий лазерного спекания, электронно-лучевая наплавка позволяет увеличить производительность за счет высокой мощности пушек и электромагнитной, а не электро-механической, развертки электронного пучка.

Готовые изделия практически не отличаются от литых деталей по механическим свойствам. Устройство считывает данные из файла, содержащего трехмерную цифровую модель, и наносит последовательные слои порошкового материала. Контурные слои модели вычерчиваются электронным пучком, плавящим порошок в местах соприкосновения. Плавка производится в вакуумных рабочих камерах, что позволяет работать с химически активными металлами, чувствительными к окислению, например, с титаном и его сплавами.

Электронно-лучевая наплавка проводится при повышенных температурах, достигающих порядка 700...1000 °С, что позволяет создавать детали с меньшими остаточными напряжениями, вызываемыми градиентом температур между уже охлажденными и еще горячими слоями. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия — отсюда максимальная прочность.

Для развития аддитивных технологий в Украине ГП «ГНИП Институт титана» совместно с

НИЦ «Титан Запорожья» предлагают инновационную технологию производства порошков титана на низкой себестоимости методом гидрирования-дегидрирования (НДН) из титана губчатого или других титаносодержащих материалов различного качества и фракционного состава [4]. Применение таких порошков для аддитивного производства представляется перспективным при наличии соответствующего оборудования для 3D печати.

Учитывая изложенное выше, специалистами ИЭС им. Е. О. Патона начаты исследования в области разработки технологий и оборудования для аддитивного производства металлических изделий методом быстрого прототипирования с использованием сырья ГП «ГНИП Институт титана» и НИЦ «Титан Запорожья». Получены опытные образцы изделий заданной формы и разработан проект лабораторного оборудования для 3D печати на базе установки для электронно-лучевой сварки типа СВ-212. Блок-схема оборудования представлена на рис. 1.

Для формирования зоны плавления используется управляемый от компьютера генератор разверток. Пучок электронов отклоняется по осям  $X$  и  $Y$  и создает зону плавления заданной формы. Процесс наплавки выполняется по программе в соответствии с установленными технологическими режимами. Объектами управления являются ток пучка, ток фокусировки, отклонение пучка по осям  $X$  и  $Y$ .

Процесс электронно-лучевой наплавки происходит в вакуумной камере при величине вакуума менее  $1 \cdot 10^{-4}$  торр. Сфокусированный пучок электронов создает зону плавки и формирует изделие, перемещаясь по заданной траектории. Далее стол в оснастке опускается и наносится следующий слой порошка. Деталь «выращивается» послойно.

В качестве порошковых материалов применяли титановые НДН порошки, представляющие собой гранулы несферической формы титанового сплава ВТ1-0.

Технологические характеристики и химический состав порошковых материалов НДН титана ВТ1-0 представлены в таблице.

По приведенной выше схеме получены образцы прямолинейной формы размерами  $12 \times 12 \times 100$  мм (рис. 2). На рис. 2 видны верхний слой изделия 1, подложка 3 с промежуточными слоями наплавленного металла. На боковой поверхности присутствуют частицы нерасплавленного металлического порошка 2. Этот порошок в дальнейшем удаляется, а поверхность металла механически обрабатывается. После отработки режимов наплавки, учитывающих фракцию порошка, величину слоя и размер перекрытия слоев получены образцы для дальнейших ис-

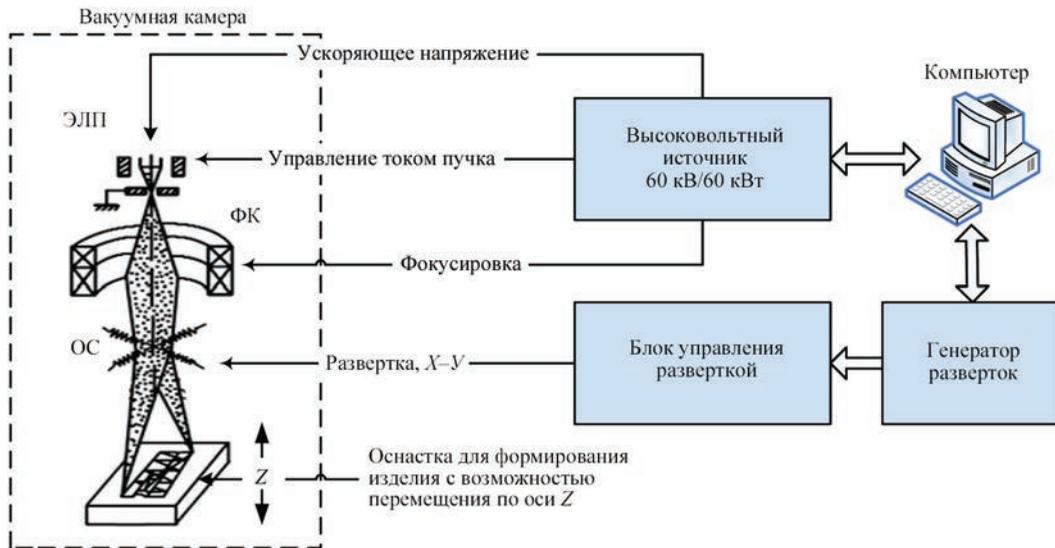


Рис. 1. Блок-схема оборудования для аддитивной электронно-лучевой наплавки: ЭЛП — электронно-лучевая пушка; ФК — фокусирующая катушка ЭЛП; ОС — отклоняющая система ЭЛП

следований. На рис. 3 представлен образец после механической обработки.

В различных сечениях образца проведены металлографические исследования микроструктуры наплавленного металла (порошок из титанового сплава BT1-0 наплавлен на основу из титанового сплава BT-20).

Структура наплавленного металла представляет собой характерную для литых титановых сплавов  $\alpha$ -фазу, дефектов — пор и несплавлений в исследуемых образцах не обнаружено.

Разработанные элементы технологии послойного наращивания с использованием HDH порошков дают возможность изготовления деталей с плотной литой структурой металла без дефектов [5].

Полученные результаты дали основу для разработки проекта промышленного оборудования для аддитивного производства изделий с использованием порошковых материалов.

Оборудование создается на основе установки для электронно-лучевой сварки типа СВ-212М.

**Технологические характеристики и химический состав порошковых материалов HDH титана BT1-0**

Фракция, мкм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание примесей, мас. %					
		N	C	H	Fe	Si	O
100...160	1,7	≤0,05	≤0,1	0,01...2,00	≤0,3	≤0,15	≤0,15
63...100	1,8	≤0,05	≤0,1	0,01...2,00	≤0,3	≤0,15	≤0,15

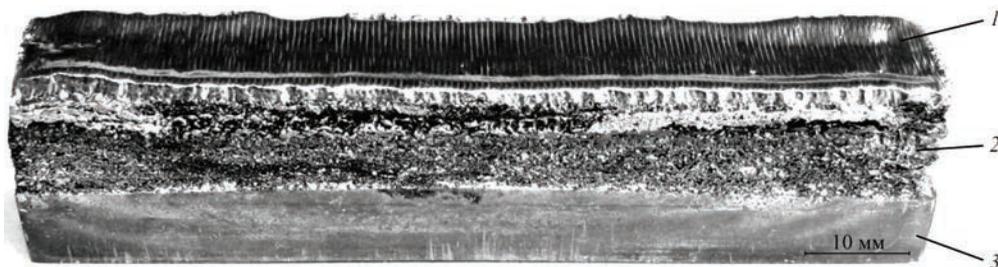


Рис. 2. Образец, изготовленный методом электронно-лучевой 3D-наплавки: 1 — верхний слой наплавленного металла; 2 — промежуточный слой металла с частицами нерасплавленного порошка по бокам образца; 3 — подложка из титана

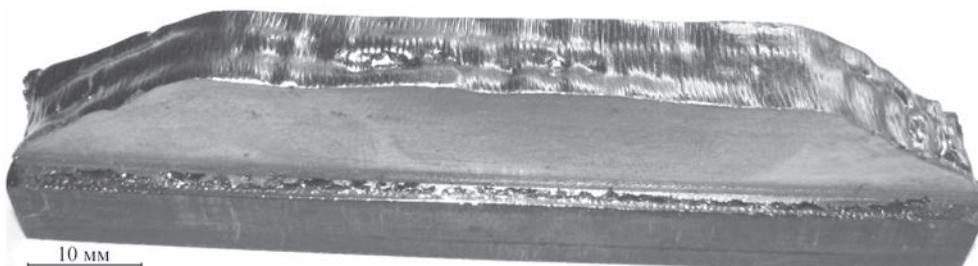


Рис. 3. Внешний вид образца после механической обработки

Предусматривается модернизация вакуумной камеры, разработка систем управления приводами перемещения стола по вертикали и узла распределения порошка в камере, а также разработка соответствующего программного обеспечения для воспроизведения аддитивного производства.

Схема установки представлена на рис. 4.

Процесс электронно-лучевой наплавки происходит в вакуумной камере 1 при величине вакуума менее  $1 \cdot 10^{-4}$  торр. Металлический порошок насыпью подается на рабочий стол 9 из бункеров 3. Рейка 4, перемещаясь вдоль стола 9, формирует на поверхности паллеты 7 слой порошка заданной толщины. В начальном положении паллета находится вверху шахты 8. Сфокусированный пучок электронов, сформированный ЭЛП 2, оплавляет поверхность порошка по заданной траектории. Таким образом, в соответствии с алгоритмом, формируются контуры изделия и его слой. Далее паллета 7 опускается на заданную величину и наносится следующий слой порошка. Процесс повторяется. Изделие 6 наращивается слой за слоем. В конце производственного цикла деталь извлекается из вакуумной камеры, очищается от нерасплавленного порошка 5 и механически обрабатывается.

Технология послойного электронно-лучевого сплавления металлов в вакууме с применением порошковых материалов позволяет создавать плотные металлические изделия заданной формы с высокой геометрической точностью. Габаритные размеры изделий составляют  $200 \times 200 \times 200$  мм, а производи-

тельность электронно-лучевой наплавки по технологии ЕВМ не превышает 0,3 кг металлического порошка в час.

**Технология послойного электронно-лучевого сплавления металлов в вакууме с применением присадочной проволоки DM.** Вторым исследуемым процессом электронно-лучевого плавления металлов является процесс плавления металлической проволоки в вакууме с образованием последовательных слоев DM. Для разогрева и плавления проволоки используется электронный пучок требуемой мощности.

Схема процесса DM приведена на рис. 5.

Наплавка происходит в вакуумной камере. Присадочная проволока подается в зону воздействия пучка электронов, где нагревается и расплавляется. ЭЛП и/или подложка, на которой формируется изделие, перемещаются, формируя слой наплавленного металла. Изделие строится по цифровой модели. Данные САД-программы преобразуются в код ЧПУ. Деталь формируется послойно — каждый последующий слой металла наплавляется на предыдущий, слой за слоем, пока изделие не достигнет заданной формы. После чего оно подвергается термической и механической обработке.

Производительность электронно-лучевой наплавки по технологии DM варьируется от 3 до 9 кг металла в час в зависимости от выбранного материала и характеристик изделия, что делает его самым быстрым процессом аддитивного производства [6].

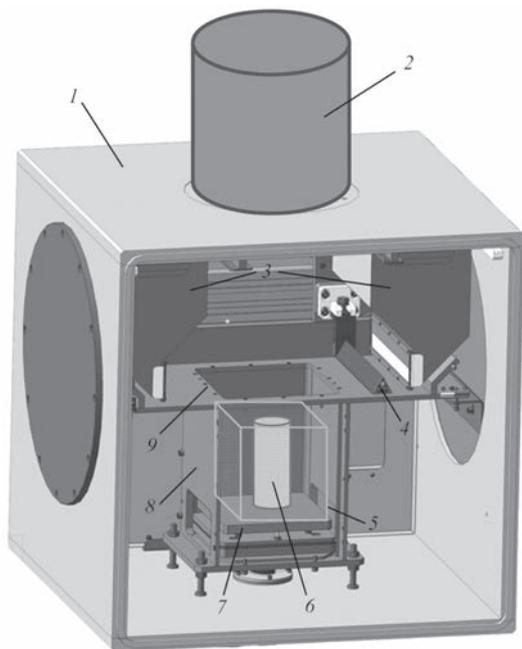


Рис. 4. Схема установки для аддитивного производства с применением металлических порошковых материалов (описание 1–9 см. в тексте)

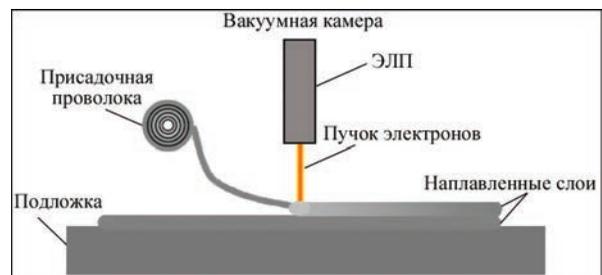


Рис. 5. Схема послойного электронно-лучевого плавления присадочной проволоки



Рис. 6. Расположение оборудования для наплавки проволокой в вакуумной камере (описание 1–6 см. в тексте)



Рис. 7. Образцы, изготовленные по технологии DM

Габариты изделий могут быть от миллиметров до нескольких метров и ограничиваются только размерами вакуумной камеры. Технология DM позволяет производить высококачественные крупногабаритные металлические конструкции длиной более 5 м.

Процесс электронно-лучевой наплавки проходит при величине вакуума менее  $1 \cdot 10^{-4}$  торр, что позволяет эффективно работать с химически активными металлами — титан, алюминий и их сплавы, металлами из жаропрочных и др. сплавов, широко применяемых на предприятиях аэрокосмической отрасли и турбиностроения. Структура изделий, полученных по технологии DM, литая и бездефектная.

КПД установок для электронно-лучевой наплавки достигает 95 %, а количество отходов при механической обработке конечного изделия незначительное. Все это позволяет утверждать о высокой производительности и экологической чистоте аддитивного производства DM.

Изучалась возможность применения присадочных проволок из титанового сплава BT1-0, алюминиевого сплава ER 4043, стальной сварочной проволоки Св-08Г2С и проволоки из нержавеющей стали ER 308.

На базе оборудования для электронно-лучевой сварки типа KL-209 создана лабораторная установка для реализации аддитивного процесса DM. В вакуумной камере установки (рис. 6) расположены: ЭЛП 2 типа ЭЛА-60; многокоординатный модуль перемещения ЭЛП 4; механизм подачи присадочной проволоки 5 с катушкой 3 и вращатель 1. На вращателе находится изделие 6, полученное по технологии DM.

На лабораторном оборудовании получено удовлетворительное формирование круглых и прямоугольных образцов, из которых есть возможность составлять сложные геометрические формы в виде комбинации тел вращения и прямоугольников. Толщина стенок образцов варьировалась от 6 до 10 мм при использовании четырех типов проволок (рис. 7).

Поперечные сечения всех наплавленных образцов формируются как литой металл без включений и пористости.

В результате проведенных работ показана возможность производить изделия заданной формы методами аддитивной электронно-лучевой наплавки с применением отечественного сырья, что позволило приступить к разработке и изготовлению опытной установки для реализации 3D технологий в промышленности.

### Список литературы

1. Смуров И. Ю., Кононов С. Г., Котобан Д. В. и др. (2015) *Разработка отечественных аддитивных технологий изготовления и контроля ответственных деталей машиностроения*. Реферат-презентация ФГБОУ ВПОМГТУ «СТАНКИН».
2. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Шевченко В. Г. и др. (2017) Получение деталей из сплавов титана аддитивными методами. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения*. **9**, 118–122.
3. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Нестеренков В. М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатным перемещением пушки и изделия. *Автоматическая сварка*, **5**, 3–7.
4. Жеманюк П. Д., Басов Ю. Ф., Овчинников А. В. и др. (2016) Применение титановых порошков нового поколения (HDH2) в аддитивных технологиях. *Авиационно-космическая техника и технология*, **8**(135), 139–144.
5. Нестеренков В. М., Матвейчук В. А., Русыник М. О., Овчинников А. В. (2017) Применение аддитивных электронно-лучевых технологий для изготовления деталей

из порошков титанового сплава VT1-0. *Автоматическая сварка*, 3, 5–10.

6. *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)*. <http://www.sciaky.com/additivemanu-facturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>. 2017.

## References

1. Smurov, I.Yu., Kononov, S.G., Kotoban, D.V. et al. (2015) *Development of domestic additive technologies for manufacture and control of critical machine-building parts*. In: Synopsis-presentation of FGBOU VPOMGTU Stankin [in Russian].
2. Skrebtsov, A.A., Ovchinnikov, A.V., Shevchenko, V.G. et al (2017) Producing of parts from titanium alloys by additive methods. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Ser.: Starodubskie Chteniya*, 9, 118-122 [in Russian].
3. Paton, B.E., Nazarenko, O.K., Nesterenkov, V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of the gun and workpiece. *The Paton Welding J.*, 5, 2-5.
4. Zhemanyuk, P.D., Basov, Yu.F., Ovchinnikov, A.V. et al. (2016) Application of titanium powders of new generation (HDH2) for the additive technology. *Aerospace technic and technology*, 8(3), 139-144 [in Russian].
5. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O. et al. (2017) Application of additive electron beam technologies for manufacture of parts of VT1-0 titanium alloy powders. *The Paton Welding J.*, 3, 2-6.
6. *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)*, <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>. 2017.

В. М. Нестеренков, В. А. Матвійчук, М. О. Руснік

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

ОТРИМАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ  
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ 3D ДРУКУ

Відзначено перспективність виготовлення широкої номенклатури деталей і вузлів літальних апаратів і двигунів із застосуванням електронно-променевих технологій. У роботі розглянуто особливості створення такої технології з використанням вітчизняної сировини у вигляді порошкових матеріалів, або присадочного дроту. На лабораторному устаткуванні виготовлено циліндричні і прямокутні зразки, що свідчать про можливість реалізації адитивної технології для потреб промисловості. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 7.

*Ключові слова:* електронно-променева наплавка, вироби заданої форми, метод 3D друку, порошкові матеріали, присадочні дроти, лабораторна установка

V.M. Nesterenkov, V.A. Matvijchuk, M.O. Rusynik

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

MANUFACTURE OF INDUSTRIAL PRODUCTS  
USING ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES  
FOR 3D-PRINTING

The prospects of manufacturing a wide range of parts and units of aircrafts and engines were noted using electron beam technologies. In the work the features of creating such technology are considered using the domestic raw materials in the form of powder materials or filler wire. In the laboratory equipment the cylindrical and rectangular specimens were manufactured, thus proving the possibility of implementing the additive technology for the needs of industry. 6 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

*Key words:* electron beam surfacing, products of specified shape, 3D-printing method, powder materials, filler wires, laboratory equipment

Поступила в редакцію 28.11.2017

16 - 18 October 2018

Fair and Exhibition Centre  
**expoSilesia**  
[www.exposilesia.pl](http://www.exposilesia.pl)

60<sup>th</sup>  
International  
Welding Conference  
Organizer:  
Institute of Welding

ExpoWELDING

IWS

International Welding Fair

ul. Braci Mieroszewskich 124 | 41-219 Sosnowiec | [expowelding@exposilesia.pl](mailto:expowelding@exposilesia.pl)

Международная Ассоциация «Сварка» (г. Киев) организует участие украинских компаний на коллективном стенде в международной сварочной выставке «ExpoWELDING 2018», г. Sosnowiec, Польша, 16-18 ноября 2018 г. Выставка проводится один раз в два года и является крупнейшей сварочной выставкой в Восточной Европе. По вопросам участия в выставке «ExpoWELDING 2018» на коллективном стенде просьба обращаться: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua). Статья, посвященная выставке «ExpoWELDING 2016» и участию в ней украинских компаний на коллективном стенде опубликована в журнале «Автоматическая сварка» № 12, 2016, стр. 63-67 и находится в открытом доступе по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2016/as201612part.pdf>.