

МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВОВ ТИТАНА ВТ20, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.М. Нестеренков¹, В.А. Матвейчук¹, М.О. Русыник¹, Т.Б. Янко², А.Е. Дмитренко³

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ПАО «Институт титана». 69035, г. Запорожье, просп. Соборный, 180. E-mail: titanlab3@ukr.net

³ННЦ «Харьковский физико-технический институт». 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1.
E-mail: dmitrenko@kipt.kharkov.ua

Методом электронно-лучевой 3D наплавки получены образцы изделий из отечественных несферических порошков титанового сплава ВТ-20. Микроструктура наплавленного металла беспористая, мелкодисперсная и равномерная по всей поверхности шлифа. Представляет собой игольчатую α' -фазу титана с малым содержанием β -фазы. Микротвердость образца от HV 3960 МПа до HV 4150 МПа. Отмечено равномерное распределение легирующих элементов и сниженное содержание алюминия вследствие его летучести при наплавке. Выявлено наличие незначительной пористости и повышенной шероховатости на краях изделия. Намечены методы их устранения. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 11.

Ключевые слова: аддитивные технологии, титановый сплав, электронный луч, наплавка, структура, микротвердость

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 деталей и узлов. В его основу положена операция послойного сплавления металлического порошка 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 [1].

Все существующие на сегодня промышленные разработки принадлежат зарубежным компаниям. Использование в Украине технологий и машин для прототипирования связано с их покупкой за рубежом и с последующими значительными затратами на приобретение необходимых материалов, которые являются расходным и дорогостоящим компонентом этой технологии.

Однако применяемые в данных установках расходные материалы — порошки титановых сплавов — имеют ряд недостатков. К ним можно отнести несоответствие составов порошковых материалов большому количеству сертифи-

цированных для предприятий Украины сплавов, а также отсутствие отечественных промышленных технологий их получения. Таким образом, имеет место проблема импортозамещения и сырьевого обеспечения оборудования для аддитивного производства.

Актуальной задачей является разработка установок на базе электронно-лучевых процессов с применением отечественных порошковых материалов, которые будут сертифицированы и ориентированы для внедрения на отечественных предприятиях.

Большой интерес данные технологии представляют для производства сложных деталей, применяемых в авиа- и турбиностроении. В последние годы наметилась устойчивая тенденция внедрения аддитивных технологий в ведущих отечественных компаниях. Для промышленных предприятий отечественного машиностроения (ГП ПО «Южмаш», ОАО «Мотор Сич», ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», ГП ЛРЗ «Мотор») актуальны задачи получения изделий с применением порошковых материалов из титановых сплавов, поскольку из этих сплавов изготавливается большое количество элементов газотурбинных двигателей.

Не следует оставлять без внимания разработку новых решений в производстве титановых порошков, что позволит снизить стоимость сырья. К числу таких решений можно отнести разработанную технологию получения порошка титановых сплавов по принципу гидрирования–дегидрирования (HDH процессы) спеченного полуфабриката [2].

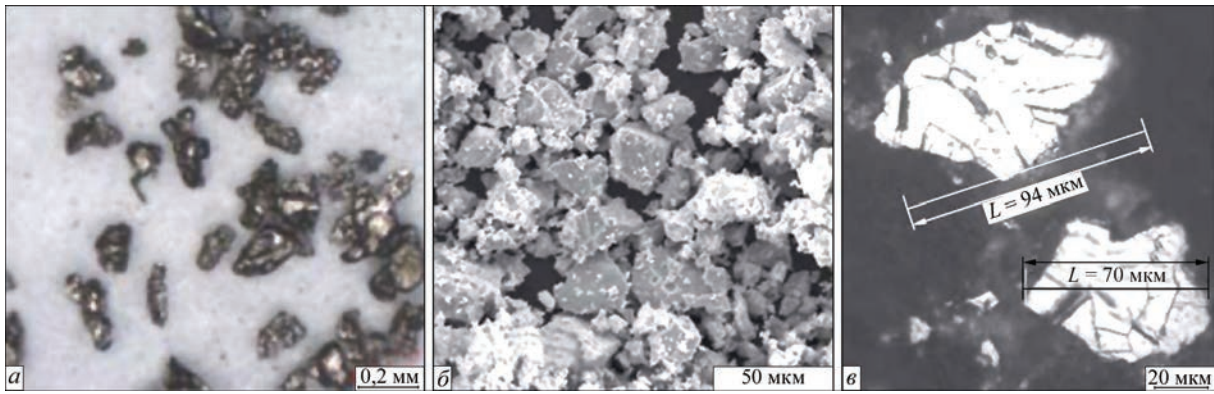


Рис. 1. Внешний вид (а) и микроструктура (б, е) порошков HDH VT20 фракции от 60 до 140 мкм

В данной работе решалась задача получения изделия из титанового сплава VT20 с применением аддитивных электронно-лучевых технологий методом послойной наплавки.

Материалы и оборудование. Для изготовления образцов изделий применялся несферический порошок титана VT20 производства отечественной компании «Ти Текнолоджи». Порошок представлял собой сплав Ti–Mo–Al–V–Zr с гранулами несферической формы и литой микроструктурой частиц (рис. 1). Выбор сплава данной системы легирования обусловлен тем, что он характеризуется хорошими антикоррозионными, жаростойкими и механическими свойствами. Сплав VT20 используется для изготовления деталей, в том числе и авиационного назначения, способных продолжительное время работать при температуре до 500 °С.

Порошок получен методом термохимического охрупчивания посредством водорода (метод гидрирования–дегидрирования, HDH) спеченной заготовки сплава VT20. Для исследований выбрана фракция с размером частиц от 60 до 140 мкм. Химический состав используемого материала приведен в таблице.

Работы по наплавке проводились на оборудовании для 3D печати, созданном на базе малогабаритной установки для электронно-лучевой сварки типа СВ-212М с импульсным источником питания 60 кВ / 60 кВт, электронно-лучевой пушкой ЭЛА-60 и пакетом прикладных программ для управления процессом 3D печати.

Оборудование и программное обеспечение разработано в Институте электросварки им. Е.О. Патона. Общий вид оборудования представлен на рис. 2.

Установка состоит из малогабаритной вакуумной камеры 1 с механизмами подачи и распределения порошка, перемещения изделия, электронно-лучевой пушки 2, высоковольтного источника питания 4 и системы управления 3. Электронно-лучевая пушка 2 установлена неподвижно на

верхней стенке вакуумной камеры. Вакуумная система установки обеспечивает величину вакуума в камере до 10^{-4} торр. В шкафах управления 3 находятся промышленный компьютер, монитор, блоки управления высоковольтным источником и вакуумной системой. Высоковольтный источник 4 позволяет получить регулируемое напряжение до 60 кВ и ток пучка до 1000 мА.

Процесс электронно-лучевой наплавки происходит в вакуумной камере 1 (рис. 3). 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 глубины. 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 выращивается слой за слоем. В конце производственного цикла

Химический состав используемого порошка VT20

Содержание легирующих элементов не более, мас.%				Содержание примесей не более, мас.%		
Zr	Mo	V	Al	N	H	O
1,5...2,5	0,5...2,0	0,8...2,5	5,5...7,0	0,05	0,015	0,15



Рис. 2. Оборудование для электронно-лучевой 3D печати (описание 1–4 см. в тексте)

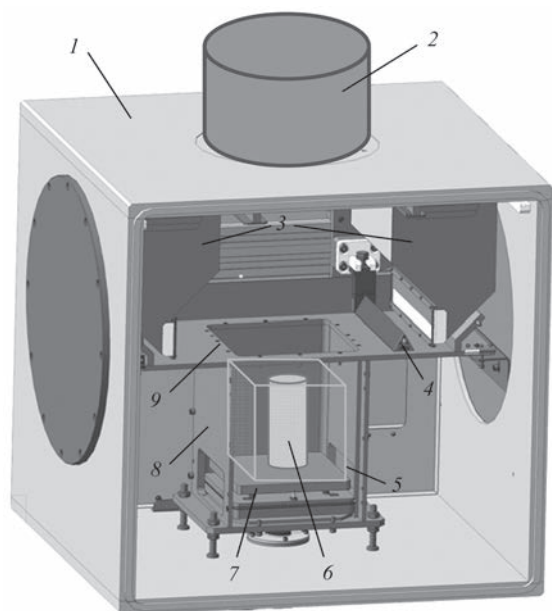


Рис. 3. Схема установки для аддитивного производства с применением металлических порошковых материалов (описание 1–9 см. в тексте)

деталь извлекается из вакуумной камеры, очищается от нерасплавленного порошка 5 и механически обрабатывается.

Блок-схема управления оборудованием приведена на рис. 4. Для формирования зоны плавления использован управляемый от компьютера программный контроллер Siemens SIMATIC WinAC. Пучок электронов отклоняется по осям X , Y и создает зону плавления заданной формы. Процесс наплавки выполняется по программе в соответствии с компьютерной моделью изделия и с предустановленными технологическими режимами. Объектами управления являются ток пучка I_w , ток фокусировки I_f , отклонение пучка по осям X и Y , а также глубина слоя порошка (ось Z).

Образец изделия в форме полого цилиндра выращивался послойно в вакуумной камере при величине вакуума $1 \cdot 10^{-4}$ торр. Каждый нанесенный



Рис. 5. Изделие в вакуумной камере 3D принтера

слой порошка предварительно разогревался под воздействием расфокусированного электронного пучка, после чего проплавлялся электронным лучом. Пучок электронов перемещался по спирали Архимеда от большего диаметра к меньшему. По окончании наплавки наносился последующий слой порошка. Таким образом, изделие выращивалось слой за слоем. Глубина каждого слоя порошка составляла 300 мкм. По окончании производственного цикла изделие охлаждалось в вакууме в течение 18 ч.

Фото изделия, расположенного в вакуумной камере 3D принтера, приведено на рис. 5, полученный образец на рис. 6. Геометрические размеры изделия: наружный диаметр 85 мм, внутренний — 55 мм, высота 35 мм.

Полученный образец был подготовлен для дальнейшего металлографического исследования особенностей формирования структуры вдоль и поперек осей наплавки. Исследование микроструктуры осуществляли на металлографическом оптическом микроскопе «Neophot-32» при различных увеличениях. Твердость фазовых составляющих измеряли на микротвердометре М-400 фирмы «LECO», нагрузка составляла 0,3 Н, время приложения 10 с. Изображение микроструктур получено при помощи фотокамеры «Olympus C-500». Структура и химический состав образцов были



Рис. 4. Блок-схема управления оборудованием для аддитивной электронно-лучевой наплавки: ЭЛП — электронно-лучевая пушка; ФК — фокусирующая катушка ЭЛП; ОС — отклоняющая катушка ЭЛП (описание остальных параметров см. в тексте)

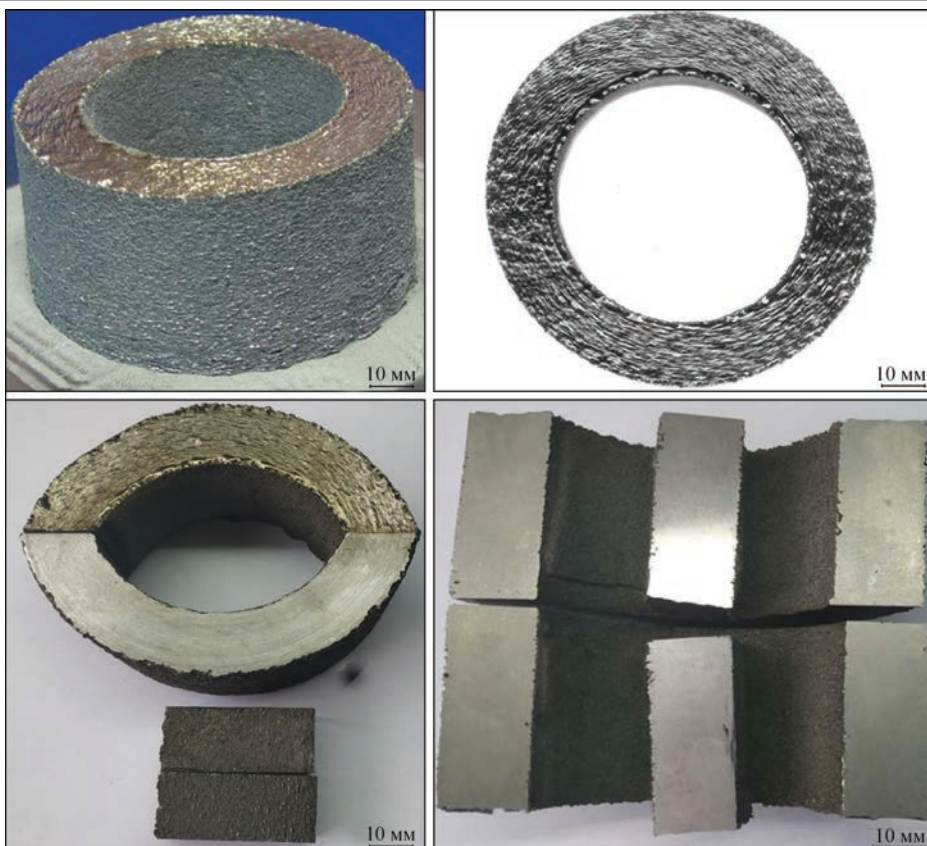


Рис. 6. Образец, выполненный методом 3D печати

изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM 7001F с ускоряющим напряжением 20 кВ. Наблюдение за структурой проводилось как в режиме вторичных электронов (SEI), так и в режиме обратного рассеяния электронов (COMPO), формирующих контраст составного изображения. Состав анализировали с использованием детектора INCA PentaFETx3 и программы Oxford Instruments INCA 4.11. Для калибровки количественного анализа использовали стандарт кобальта с чистотой 99,99 %. Для определения степени распределения основных элементов сплава проводилось исследование в режиме картирования.

Результаты и обсуждения. Для исследования свойств наплавленного металла были сделаны поперечные разрезы и изготовлены макрошлифы, один из которых приведен на рис. 7.

Анализ поперечных шлифов показывает получение плотной литой структуры наплавленного металла. В целом дефекты формирования отсутствуют. Ближе к боковым поверхностям фиксируются отдельные несплавления (рис. 8), свидетельствующие о необходимости корректировки технологического процесса расплавления краевых слоев изделия. Устранение подобных дефектов возможно путем предварительного формиро-

вания наружного и внутреннего контуров изделия с последующим их оплавлением и заполнением межконтурного пространства литым металлом при сканировании электронного пучка.

Для исследования химического состава изделия применяли рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) — метод определения состава вещества посредством анализа характеристического рентгеновского излучения. Результаты исследова-



Рис. 7. Макрошлиф поперечного сечения изделия из титанового сплава BT20

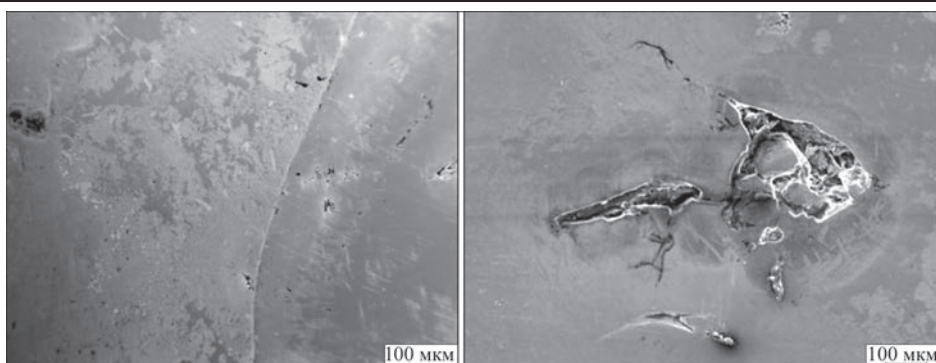


Рис. 8. Дефекты на поверхности поперечного сечения образца

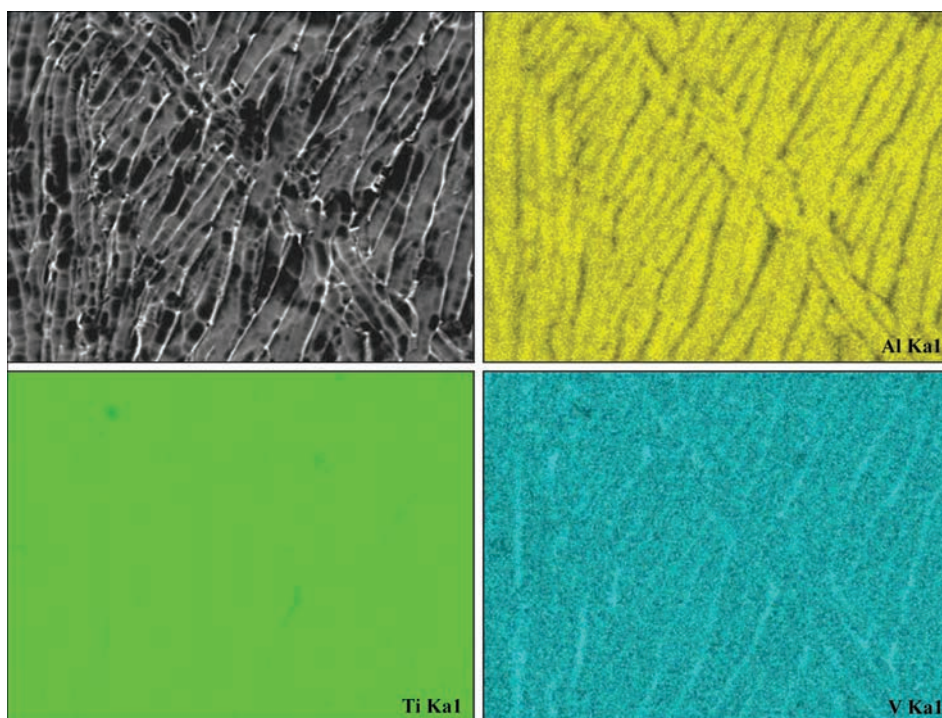


Рис. 9. Рентгеноспектральный микроанализ распределения титана, алюминия и ванадия в образце (слева сверху — электронное изображение)

ний приведены на рис. 9 и 10. Исследуемый объект подвергали воздействию электронного пучка, который вызывал рентгеновское излучение. Образец бомбардировался высокоэнергетическими электронами, в результате чего с его поверхности происходила эмиссия рентгеновского излучения. Из анализа характеристического рентгеновского излучения определяли, какие элементы и в каких количественных соотношениях входят в состав изделия. Большому содержанию элемента соответствуют более интенсивный цвет (рис. 9) или наличие пиков на кривой интенсивности по линии или площади сканирования (рис. 10).

Рентгеноспектральный микроанализ (рис. 9) подтверждает, что легирующие элементы распределены равномерно. Кроме того, ванадий имеет повышенную концентрацию по границам зерен α -фазы, что является характерным для титановых сплавов данной системы легирования.

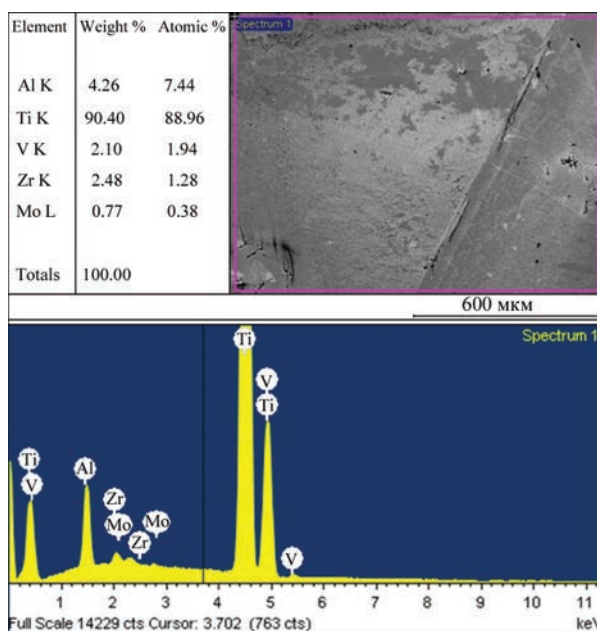


Рис. 10. Элементный EDX-анализ образца

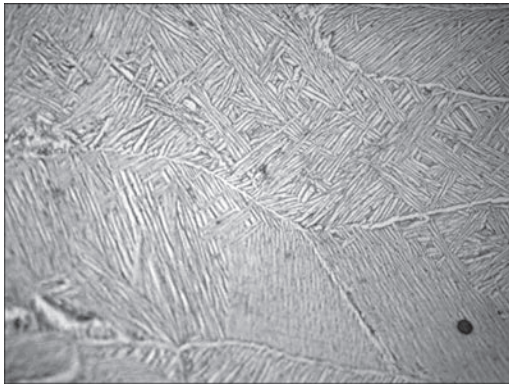


Рис. 11. Микроструктура ($\times 500$) металла наплавки (порошок VT20)

Однако, как показал EDX-анализ — метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (рис. 10), содержание алюминия несколько отличается от пределов, заданных ГОСТ 19807–91 «Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки», а также значений, указанных в таблице. Отклонение, по всей видимости, связано с повышенной летучестью паров алюминия в условиях сплавления при высоком вакууме.

Для устранения этого недостатка необходимо в исходном материале — порошках титановых сплавов — поддерживать содержание алюминия на более высоком уровне. Процентное превышение содержания алюминия в исходной шихте следует подбирать эмпирически в зависимости от типа сплава. В целом микроструктура наплавленного металла мелкодисперсная и равномерная по всей поверхности шлифа, представляет собой кристаллиты, вытянутые в направлении теплоотвода.

Структура наплавки в теле кристаллитов в основном представляет собой игольчатую α' -фазу (пересыщенный твердый раствор замещения легирующих элементов в α -титане) и небольшое количество β -фазы (рис. 11).

Границы зерен чистые без включений. Проплавленные части образца беспористые, что свидетельствует о полном проплавлении слоя порошка в процессе 3D печати.

Твердость металла на всех участках существенно не отличалась и находилась в пределах от HV 3960 МПа до HV 4150 МПа.

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанная технология аддитивной электронно-лучевой наплавки позволяет получать из несферических порошков титановых сплавов VT-20 изделия сложной формы с наличием в них заданных чертестом полостей.

Выводы

1. Выполнена аддитивная электронно-лучевая наплавка изделий заданной формы из несферических порошков титановых сплавов.

2. Показана уверенная работа оборудования, что подтверждает правильность принятых конструктивных решений.

3. Получены образцы с хорошим формированием литой структуры наплавленного металла и однородным химическим составом.

4. Выявлены недостатки, связанные с режимами наплавки порошковых композиций.

5. Обозначена необходимость увеличения содержания алюминия в исходном сырье для компенсации его эвакуации в вакуумную систему.

6. Определены направления дальнейших исследований и усовершенствований аддитивных электронно-лучевых технологий.

Список литературы/References

1. 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. *Автоматическая сварка*, **3**, 5–10.
2. Nesterenkov V.M., Matvejchuk V.A., Rusynik M.O., Ovchinnikov A.V. (2017) Application of additive electron beam technologies. *The Paton Welding J.*, **3**, 2-6.
3. Янко Т.Б., Овчинников А.В. (2018) Титан в аддитивных технологиях. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения*, 217–222.
4. Yanko T.B., Ovchinnikov A.V. (2018) Titanium in additive technologies. *Construction, materials science and machine building: Starodubov Readings*, 217-222
5. Нестеренков В.М., Хрипко К.С., Орса Ю.В., Матвейчук В.А. (2018) Электронно-лучевые технологии в авиастроении. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. У 2-х т. Т. 2. Лобанов Л.М. та ін. (ред.). Київ, Академперіодика, сс. 192–221.
6. Nesterenkov V.M., Khripko K.S., Orsa Yu.V., Matvejchuk V.A. (2018) Electron beam technologies in aircraft construction. *Materials Science: Achievements and prospects*. In 2 vol. , Vol 2, ed. By L. M. Lobanov. Kyiv, Akademperiodika, pp. 192-221
7. Matviichuk V.A, Nesterenkov V.M., Rusynik M.O. (2018) Application of additive electron-beam technologies for manufacture of metal products. *Electrotechnica &Electronica E+E*, **3** **4**, 69–73.
8. Mahale T.R. (2009) *Electron beam melting of advanced materials and structures*: Ph.D. dissertation, North Carolina State University, NC, US.
9. Gaytan S., Murr L., Medina F. et al. (2009) Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting. *Materials Technology*, **24**(3), 180–190.
10. Záh M.F., Lutzmann S. (2010) Modelling and simulation of electron beam melting. *Production Engineering*, **4**(1), 15–23.
11. Muth T.R., Yamamoto Y., Frederick D.A. et al. (2018) Causal Factors of Weld Porosity in Gas Tungsten Arc Welding of Powder-Metallurgy-Produced Titanium Alloys. *JOM*, **65**, **5**, 643–651.
12. Price S., Cheng B., Lydon J. et al. (2015) On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Process Parameter Effects. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **6** , p. 061019.

МІКРОСТРУКТУРА СПЛАВІВ ТИТАНУ VT20, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІТЧИЗНЯНИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В.М. Нестеренков¹, В.А. Матвійчук¹, М.О. Русинік¹, Т.Б. Янко², А.Е. Дмитренко³

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ПАО «Інститут титану». 69035, м. Запоріжжя, пр. Соборний, 180. E-mail: titanlab3@ukr.net

³ІНЦ «Харківський фізико-технічний інститут». 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1. E-mail: dmitrenko@kipt.kharkov.ua

Методом електронно-променевої 3D наплавлення отримані зразки виробів із вітчизняних несферичних порошків титанового сплаву VT-20. Мікроструктура наплавленого металу безпориста, дрібнодисперсна та рівномірна по всій поверхні шліфа. Являє собою голчасту α' -фазу титану з малим вмістом β -фази. Мікротвердість зразка від HV 3960 МПа до HV 4150 МПа. Відзначено рівномірний розподіл легуючих елементів і знижений вміст алюмінію внаслідок його летючості при наплавленні. Виявлено наявність незначної пористості та підвищеної шорсткості на краях виробу. Намічено методи їх усунення. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 11.

Ключові слова: адитивні технології, титановий сплав, електронний промінь, наплавлення, структура, мікротвердість

MICROSTRUCTURE OF VT20 TITANIUM ALLOYS PRODUCED BY METHOD OF LAYER-BY-LAYER ELECTRON BEAM FUSION USING DOMESTIC POWDER MATERIALS

V.M. Nesterenkov¹, V.A. Matveychuk¹, M.O. Rusynik¹, T.B. Yanko², A.E. Dmitrenko³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²PJCS «Titanium Institute». 180 Soborny Ave., 69035, Zaporozhye, Ukraine. E-mail: titanlab3@ukr.net

³NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology». 1 Akademicheskaya Str., 61108, Kharkov, Ukraine. E-mail: dmitrenko@kipt.kharkov.ua

Samples of products of domestic non-spherical powders of VT-20 titanium alloy were obtained by method of electron beam 3D-deposition. Microstructure of deposited metal is a porous-free, fine-dispersed and uniform along the whole surface of section. It is acicular titanium α' -phase with small content of β -phase. Sample microhardness is from HV 3960 to 4150 MPa. Uniform distribution of alloying elements and decreased content of aluminum due to its volatility in deposition was noted. Presence of insignificant porosity and increased roughness on part edges was determined. The methods of their elimination were outlined. Ref. 10, Tabl. 1, Fig. 11.

Keywords: additive technologies, titanium alloy, electron beam, deposition, structure, microhardness

Поступила в редакцію 12.06.2019



Mining World Ukraine Міжнародна виставка гірничодобувної, вугільної та будівельної промисловості

Запоріжжя • ВЦ «Козак Палац» **8-10 жовтня 2019**

Mining World Ukraine — єдина в Україні міжнародна спеціалізована виставка гірничодобувної галузі. Провідними іноземними та національними компаніями будуть представлені новітні розробки обладнання, спеціальної техніки та технологій.

Виставка орієнтована на керівників підприємств, топ-менеджерів гірничодобувних компаній, металургійних та гірничо-збагачувальних підприємств, проектних організацій та вузів, а також державних структур природоохоронного, геологічного та екологічного напрямків, охорони праці, гірничого нагляду.