

УДК 669.295; 339.944

А. В. ОВЧИННИКОВ¹, Ю. Ф. БАСОВ², И. А. ПЕТРИК²,
А. А. СКРЕБЦОВ¹, Ю. А. МАРЧЕНКО²¹ Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина² АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина**РЕАЛИЗАЦИЯ АДДИТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ**

В работе исследована структура образцов из титановых сплавов, полученных электронно-лучевым сплавлением на установках типа СВ-212М порошков отечественного производства. В качестве исходного сырья были выбраны несферические порошки титанового сплава BT1-0, полученные по технологии гидрирования – дегидрирования. Получены и исследованы образцы размером 12х12х100 мм. Исследованы структуры наплавленных слоев. Установлено отсутствие пористости и несплавлений в полученных образцах. Исследована возможность реализации сложной геометрии детали с применением методов электронно-лучевой наплавки с использованием перспективного порошка титанового сплава BT1-0.

Ключевые слова: электронный луч, слой, 3D наплавка, порошок титановый, структура

Введение

Необходимость применения аддитивных технологий (АТ) в высокотехнологичных отраслях производства [1] обусловлена увеличением конкурентоспособности и технологическим усложнением форм деталей. В настоящее время существуют два принципиально разных подхода в АТ: избирательное лазерное плавление (Selective Laser Melting – SLM) и электронно-лучевое плавление (Electron Beam Melting – EBM). Активному внедрению АТ препятствует высокая стоимость зарубежного порошка (более 500\$ за 1 кг), а также отсутствие сертифицированных порошков имеющих требуемый для отечественного производства химический состав [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Актуальной задачей является разработка установок для 3D печати, которые будут работать с применением отечественных порошковых материалов [1, 3]. Существующие решения не в полной мере позволяют решить проблемы АТ и сырьевого обеспечения [3-9].

Наиболее актуальными вопросы производства изделий по АТ возникают в медицине, где в каждом конкретном случае требуется индивидуальное технологическое решение. Затраты на подготовку к производству за счет использования АТ можно снизить на порядки.

В ряде конструкций ГТД применяются детали из не легированного титана, состава BT1-0.

Для изготовления порошков как легированных, так и нелегированных титановых сплавов требуется

титановая губка. При производстве губки получают сопутствующий продукт – термомеханические порошки титана (ПТ). Стоимость таких порошков не превышает 20\$ за 1 кг. Для уменьшения фракционного состава порошка, а также получения порошка сплава BT1-0 использовали технологию гидрирования – дегидрирования (HDH). В этом направлении, с целью снижения себестоимости, перспективным будет применение порошков титана типа ПТ для АТ производства изделий с индивидуальной геометрией.

В работе ставилась задача получения титанового изделия из отечественных материалов и мощностей. Для чего ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины была проведена модернизация установки электронно-лучевой сварки (ЭЛС) типа СВ-212М и разработано устройство для наплавки порошка несферической формы.

1. Методика проведения исследований

Для изготовления изделий из титанового сплава BT1-0 применялся несферический порошок титана, предоставленный НИЦ «Титан Запорож्या» ЗНТУ. Порошки представляли собой гранулы несферической формы титанового сплава BT1-0 с литой микроструктурой частиц (рис. 1). Технологические характеристики и химический состав порошковых материалов HDH титана BT1-0 приведен в табл. 1.

Работы выполняли на малогабаритной установке электронно-лучевой сварки (ЭЛС) типа СВ-212М с импульсным источником питания 60кВ/60кВт, электронно-лучевой пушкой ЭЛА-60 и пакетом

прикладных программ.

Оборудование и программное обеспечение разработано в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Принцип работы установки заключается в следующем: сфокусированный пучок электронов создает зону плавки и формирует изделие, перемещаясь по заданной траектории. После проведения плавки камера открывается и наносится следующий слой порошка. Деталь «выращивается» послойно. Блок-схема оборудования для аддитивной электронно-лучевой наплавки представлена на рис. 2.

Пучок электронов, необходимый для нагрева поверхности с нанесённым металлическим порошком, формируется в электронно-лучевой пушке (ЭЛП), которая запитана от высоковольтного источника. Управляет источником промышленный компьютер. В состав источника входят системы управления фокусировкой и током пучка. Для формирования зоны плавления использован генератор, создающий сигналы управления разверткой.

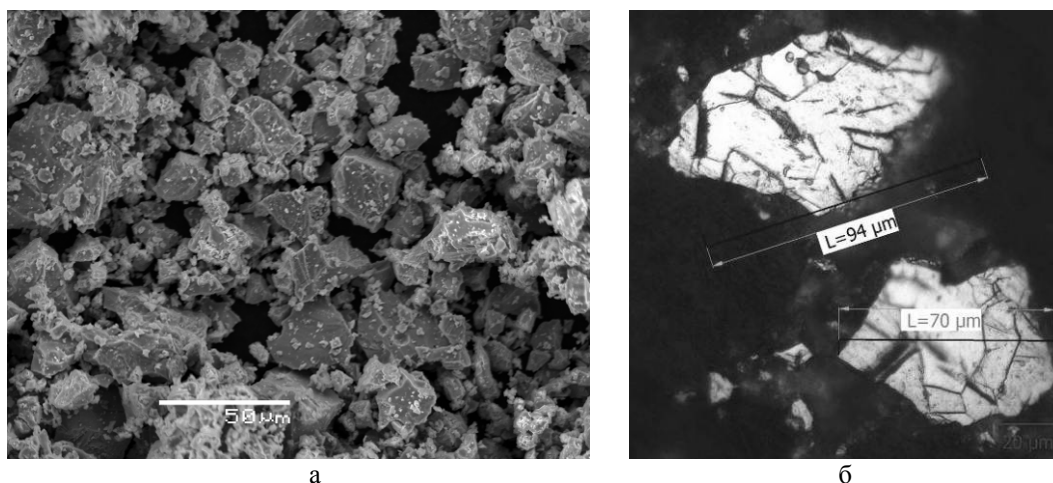


Рис. 1. Внешний вид (а) и микроструктура (б) порошков BT1-0 HDN фракции -160+40 мкм применяемых для наплавки

Таблица 1
Технологические характеристики и химический состав порошковых материалов HDN титана BT1-0

Фракция, мкм	Текущность, с (Ø5 мм)	Плотность, г/см ³	Содержание примесей, % масс. долей					
			N	C	H	Fe	Si	O
-160+100	11,3	1,7	≤0,05	≤0,1	0,012	≤0,3	≤0,15	≤0,15
-100+63	-	1,8	≤0,05	≤0,1	0,012	≤0,3	≤0,15	≤0,15

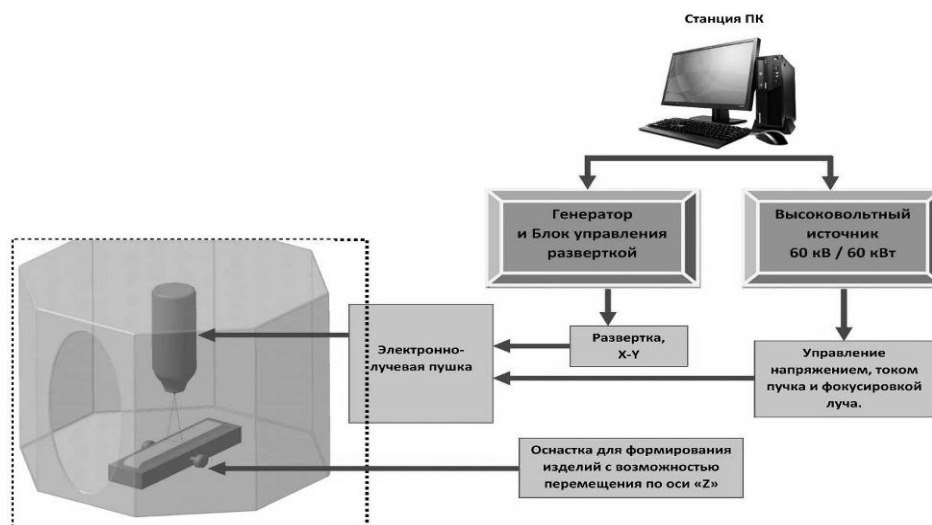


Рис. 2. Блок-схема оборудования для аддитивной электронно-лучевой наплавки

В блоке управления разверткой эти сигналы усиливаются и поступают на отклоняющие катушки электронно-лучевой пушки. Пучок электронов отклоняется по осям X и Y и создает зону плавления заданной формы. Процесс выполняется по программе в соответствии с технологическими режимами. Объектами управления являются ток пучка, ток фокусировки, отклонение пучка по осям X и Y.

Для реализации аддитивных процессов на стандартной установке для ЭЛС, был разработан модуль послойной подачи порошковых материалов.

Порошок на подложку наносится с помощью дозатора. Излишки удаляются скребком после чего, при необходимости, слой уплотняется специальным формирующим устройством. При этом формируется гладкая поверхность с равномерно распределенным слоем порошка. Перед нанесением последующего слоя стол опускается на заданную величину, которая контролируется микрометром часового типа.

При этом расстояние между катодом ЭЛП и поверхностью зоны плавки остается фиксированным и не изменяется в процессе создания всей детали. Данный модуль помещался в рабочую вакуумную камеру. Его конструкция обеспечивала реализацию следующих технологических факторов: изменение слоя порошковых материалов в диапазоне от 50 до 500 мкм; четкое формирование рабочего пространства 100×15×50 мм; применение съемной титановой подложки, изменение степени уплотнения насыпного слоя порошка.

Разработанный модуль дает возможность применения как традиционно используемого в машинах 3D печати сферического, так и опытного несферического порошка. Важной особенностью данного устройства является возможность уплотнения порошков, что для несферических порошков позволяет повысить плотность слоя.

2. Результаты работы

Путем послойного выращивания по вышеприведенной схеме получили образцы из титанового сплава ВТ1-0. Форма образца прямолинейная, размерами 12×12×100 мм (рис. 3).

На фотографии видны верхний слой изделия (поз. 1), подложка (поз. 3) с промежуточными слоями наплавленного металла. На боковой поверхности присутствуют частицы нерасплавленного металлического порошка (поз. 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 исследований. На рис. 4 представлено изделие после механической обработки. Поверхность наплавленного металла обработана фрезерованием.

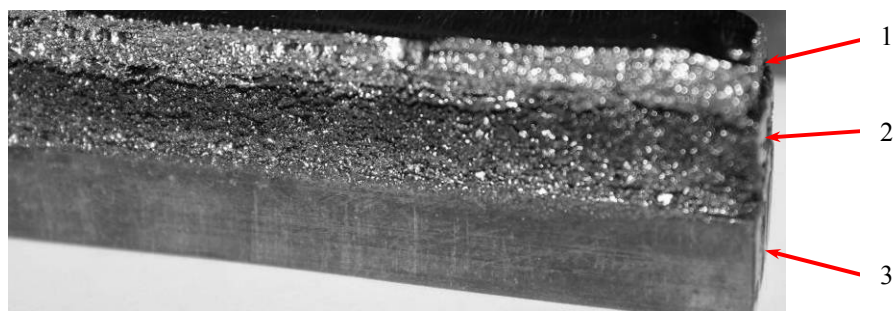


Рис. 3. Образец изделия, изготовленный методом электронно-лучевой 3D-наплавки: 1- верхний слой наплавленного металла; 2- промежуточный слой металла с частицами нерасплавленного порошка; 3 – подложка из титана



Рис. 4. Изделие после механической обработки

После фрезерования проводили визуальный контроль на наличие несплавлений слоев. Анализ поверхностей после фрезерной обработки (рис. 5) позволил установить отсутствие видимых несплошностей металла.

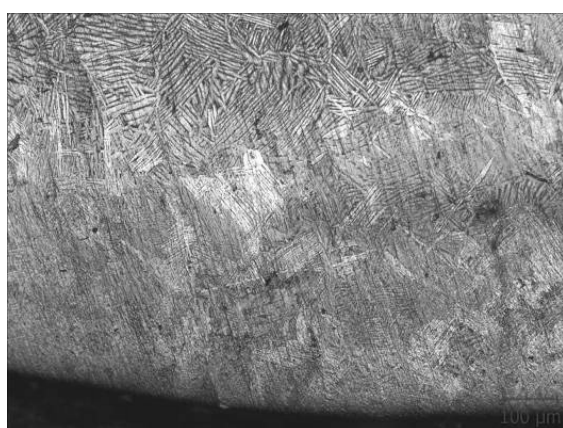
С целью определения качества сплавления слоев и оценки структуры проводили металлографические исследования в разных сечениях полученного образца.

Металлографические исследования микро-структуры наплавленного металла (порошок из титанового сплава ВТ1-0 наплавлен на основу из титанового сплава ВТ-20) позволили установить следующие закономерности в формировании структуры. Структура наплавленного металла состояла из пластинчатой α -фазы. В зависимости от размера слоя и фракции порошковых материалов изменялись размеры пластин игольчатой α -фазы, а также имели место выделения α' -фазы. Образование закалочных структур характерно для фракций менее 80 мкм, что связано с низкой энергией источника и быстрым теплоотводом в объем ранее сформированного литого металла (рис. 5).

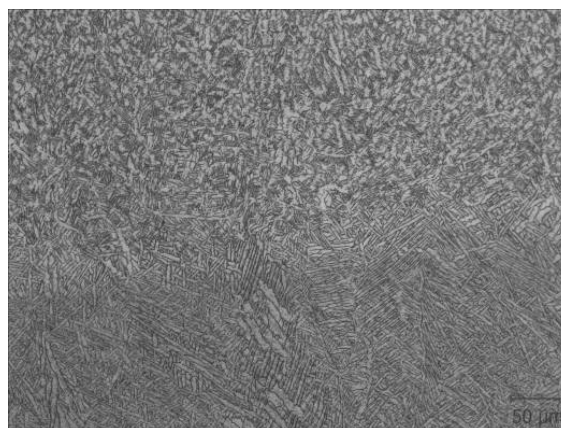
В дальнейшем проведены исследования микро-структуры в различных зонах образцов (рис. 6), полученных из порошков фракции -100+63 мкм. Литая структура у линии сплавления с подложкой отличается размерами и конфигурацией пластин α -фазы. В корне наплавки они крупнее и имеют более полиэдрическую форму, чем в средней части и на краю наплавки. Это связано со скоростью охлаждения: при малых скоростях образуются более крупные пластины, а при высоких - формируется мелко-игольчатая α' структура.

У внешнего края наплавки пластины вытянуты в направлении теплоотвода с зазубренными границами. Переходные зоны слоев наплавки отличаются некоторым измельчением пластин и увеличением количества игольчатой фазы (α' -фаза). В структуре исследуемого образца не обнаружено дефектов - пор, несплавлений.

Как следует из анализа микроструктур слоев наращённого металла, в структуре образца формируются характерные структурные зоны, размер которых зависит от размера насыпного слоя порошка и его фракции.



а



б

Рис. 5. Микроструктура металла в центре образца: а – слой, глубиной до 100 мкм; б – более 100 мкм

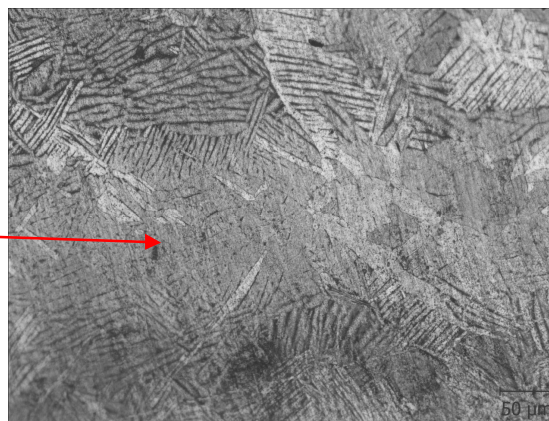
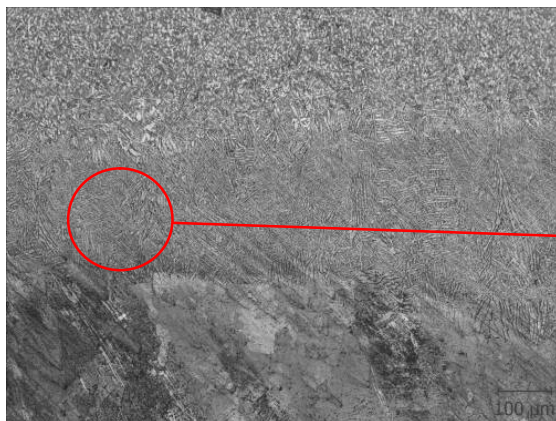


Рис. 6. Структура наплавленного металла у линии сплавления

В целом, форма порошка не повлияла на характер сплавления слоев металла и всего изделия. Это позволяет делать вывод о перспективности применения недорогого серийно-выпускаемого порошка нелегированного титана, типа ПТ, для производства изделий из титановых сплавов аддитивными методами.

Выводы

1. Впервые предложена технология производства порошков титана низкой себестоимости методом гидрирования-дегидрирования из титана губчатого или других титансодержащих материалов, различного качества и фракционного состава.

2. Исследовано качество сплавления порошков несферической формы при электронно-лучевой 3D-наплавке. Установлено, что структурные отличия проявляются в размерах, структурных составляющих α -фазы и являются следствием различной скорости охлаждения слоев. Важным является тот факт, что независимо от фракции порошка и размеров слоя структуры образцов представляют собой характерную для литых титановых сплавов α -фазу. Это позволяет сделать вывод, что форма порошковых материалов, в нашем случае несферическая, не влияет на структуру наплавленного металла.

3. Разработаны элементы техники и реализована возможность изготовления деталей заданной формы с применением аддитивных процессов методом электронно-лучевого послойного наращивания с использованием несферических порошков титана, которые позволяют получить плотную литую, однородную структуру наплавленного металла, характерную для α -титановых сплавов, применяемых в ГТД.

Литература

1. Петрик, И. А. Разработка порошков титановых сплавов для аддитивных технологий применительно к деталям ГТД [Текст] / И. А. Петрик, А. В. Овчинников, А. Г. Селиверстов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8 (125). – С. 11-16.

2. Разработка отечественных аддитивных технологий изготовления и контроля ответственных деталей машиностроения [Текст] / И. Ю. Смуров, С. Г. Кононов, Д. В. Котобан и др. // *Реферат-презентация. ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»*.

3. Электронно-лучевая сварка [Текст] / О. К. Назаренко и др.; под. ред. Б. Е. Патона. – К.: Наук. думка, 1987. – 256с.

4. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатным перемещением пушки и изделия [Текст] / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков и др. // *Автоматическая сварка*. – 2004. – С. 37.

5. 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей. [Текст] / С. В. Ахонин, Э. Л. Вржизhevский, В. Ю. Белоус и др. // *Автоматическая сварка*. – 2016. – № 5-6. – С. 141-144.

6. Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану [Текст] / О. М. Івасишин, О. Б. Бондарчук, М. М. Гуменяк и др. // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2011. – Т. 12, № 4. – С. 900-907.

7. Жуков, В. В. Аддитивное производство металлических изделий (Обзор) [Текст] / В. В. Жуков, Г. М. Григоренко, В. А. Шаповалов // *Автоматическая сварка*. – 2016. – № 5-6. – С. 148-153.

8. Производство порошков из гидрированного губчатого титана [Электронный ресурс] / Сайт ГП «ГНИП Институт титана». – Режим доступа: http://timag.org/ru_propose.php. – 25.01.2017

9. Уплотняемость порошковых материалов с различной формой частиц [Текст] / В. Е. Ольшанецкий, А. В. Овчинников, А. А. Джуган и др. // *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. – 2015. – № 1. – С. 130 – 133.

References

1. Petrik, I. A., Ovchinnikov, A. V., Seliverstov, A. G. Razrabotka poroshkov titanovykh splovov dlya additivnykh tekhnologii primenitel'no k detalyam GTD [Development of powdered titanium alloys for additive technologies applied to GTE parts]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 8, pp. 11-16.

2. Smurov, I. Yu., Kononov, S. G., Kotoban, D. V., Nazarov, A. P., Sundukov, S. K. Razrabotka otechestvennykh additivnykh tekhnologii izgotovleniya i kontrolya otvetstvennykh detalei mashinostroeniya [Development of domestic additive technologies for the manufacturing and control of critical engineering parts]. Referat-prezentatsiya. FGBOU VPO MGTU «STANKIN».

3. Nazarenko, O. K. Elektronno-luchevaya svarka [Electron - beam welding]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 256 p.

4. Paton, B. E., Nazarenko, O. K., Nesterenkov, V. M. Komp'yuternoe upravlenie protsessom elektronno-luchevoi svarki s mnogokoordinatnym peremeshcheniem pushki i izdeliya [Computer control of the electron-beam welding process with multi-axis movement of the gun and the product]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2004, pp. 37

5. Akhonin, S. V., Vrzhezhevskii, E. L., Belous, V. Yu., Petrichenko, I. K. 3D elektronno-luchevaya naplavka titanovykh detalei [3D electron-beam surfacing of titanium parts]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2016, no. 5-6, pp. 141-144.

6. Ivasishin, O. M., Bondarchuk, O. B., Poverkhnevi, M. M. Yavishcha pri nagrivanii poroshku gidridu titanu [Surface phenomena when the titanium hydride powder is heated]. *Fizika i khimiya tverdogo tila* Publ., 2011, vol. 12, no. 4, pp. 900-907.

7. Zhukov, V. V., Grigorenko, G. M., Shapovalov, V. A. Additivnoe proizvodstvo metallicheskih izdelii (Obzor) [Additive manufacturing of metal product]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2016, no. 5-6, pp. 148-153.

8. *Proizvodstvo poroshkov iz gidrirovannogo gubchatogo titana* [Production of hydrogenated sponge titanium powders]. Available at: http://timag.org/ru_propose.php (accessed 25.01.2017).

9. Ol'shanetskii, V. E., Ovchinnikov, A. V., Dzhugan, A. A., Mikhailyutenko, O. A. Uplotnyaemost' poroshkovykh materialov s razlichnoi formoi chastits [Compactibility of powder materials with different particle shapes]. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*, 2015, no. 1, pp. 130-133.

Postupila v redaktsiu 12.05.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. А. Митяев, Запорожский Национальный технический университет, Запорожье, Украина.

РЕАЛІЗАЦІЯ АДИТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ І ВИГОТОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ АВІАДВИГУНІВ

О. В. Овчинников, Ю. Ф. Басов, І. А. Петрик, А. А. Скребцов, Ю. А. Марченко

В роботі досліджено структуру зразків з титанових сплавів, отриманих електронно-променевим сплавом на установках типу СВ-212м порошків вітчизняного виробництва. В якості вихідної сировини були обрані несферичних порошки титанового сплаву BT1-0, отримані за технологією гідрування - дегідрування. Отримано і досліджено зразки розміром 12x12x100 мм. Досліджено структури наплавлених шарів. Встановлено відсутність пористості і несплавлення в отриманих зразках. Досліджено можливість реалізації складної геометрії деталі з застосуванням методів електронно-променевого наплавлення з використанням перспективного порошку титанового сплаву BT1-0.

Ключові слова: електронний промінь, шар, 3D наплавлення, порошок титану, структура

IMPLEMENTATION OF WELDING ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES IN DESIGN AND MANUFACTURE OF AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINE PARTS

A. V. Ovchinnikov, Y. F. Basov, I. A. Petrik, A. A. Skrebtsov, Y. A. Marchenko

This paper presents a research of titanium alloy specimen structures obtained by electron-beam melting of domestically produced powders performed on CB-212M type installations. Titanium alloy BT1-10 granular powders obtained by hydrogenating-dehydrogenating have been selected as a feedstock. The 12x12x100 mm specimens have been obtained and investigated. Deposited layer structures have been investigated. Neither porosity, nor incomplete fusions in the obtained specimens have been found. A possibility for manufacturing of a part with complex geometry, employing electron-beam building up technique and the advanced titanium alloy BT1-10 powder, has been investigated.

Keywords: electron beam, layer, 3D building up, titanium powder, structure

Овчинников Александр Владимирович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Оборудование и технология сварочного производства», Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Басов Юрий Федорович – кан. техн. наук, заместитель главного конструктора АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина.

Петрик Игорь Андреевич – канд. техн. наук, главный сварщик АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Скребцов Андрей Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры механики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: nic_tz@ukr.net.

Марченко Юрий Анатольевич – вед. инж. по сварке АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: marchenko2126@mail.ru.

Ovchinnikov Aleksandr Vladimirovich – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of Equipment and Technology of Welding Production, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporozhye, Ukraine.

Basov Yrii Fedorovich – Candidate of Technical Science, deputy chief designer, of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine.

Petrik Igor Andreevich – Candidate of Technical Science, chief welder of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine.

Skrebtsov Andrei Andreevich – Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Mechanics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporozhye, Ukraine.

Marchenko Yrii Anatolievich – lead engineer of welding of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine.