

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT1-0

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ¹, В. А. МАТВЕЙЧУК¹, М. О. РУСЫНИК¹, А. В. ОВЧИННИКОВ²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Запорожский нац. техн. ун-т. 09063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64. E-mail: iaov@rambler.ru

Исследована возможность применения гидрированно-дегидрированных (HDH) порошков титана отечественного производства для изготовления изделий методом аддитивной электронно-лучевой плавки на установках типа СВ-212М. Для исследований применялся порошок HDH технически чистого титана марки VT1-0. Разработаны элементы техники изготовления деталей методом послойной 3D наплавки. Получены и исследованы образцы изделий заданной формы размером 12×12×100 мм. Изучены структуры наплавленных слоев. Отмечено отсутствие пористости и несплавлений в полученных образцах изделий. Показана возможность создания детали заданной формы с применением методов аддитивной электронно-лучевой наплавки с использованием порошка титанового сплава VT1-0 отечественного производства. Библиогр. 9, табл. 1, рис. 12.

Ключевые слова: электронный луч, слой, аддитивные технологии, порошок титановый, структура

Аддитивные технологии (АТ) получили широкое коммерческое и промышленное распространение для изготовления высокопрочных объемных изделий из металлических порошков. Для этих целей преимущественно применяют технологии избирательного лазерного плавления (Selective Laser Melting – SLM), обеспечивающие формирование изделия путем сплавления порошка металлов лазерным лучом в среде защитного газа, и технологии электронно-лучевого плавления (Electron Beam Melting – EBM) — формирование изделий путем сплавления порошка металлов электронным лучом в вакуумной камере.

Большой интерес данные технологии представляют для производства сложных деталей, применяемых в авиадвигателестроении. В последние годы наметилась устойчивая тенденция внедрения АТ в ведущих авиадвигателестроительных компаниях [1]. Для промышленных предприятий отечественного машиностроения (ОАО «Мотор Сич», ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», ГП ЛРЗ «Мотор») при изготовлении и ремонте деталей газотурбинных двигателей (ГТД) актуальны задачи выращивания изделий с применением порошковых материалов из титановых сплавов [2], поскольку из этих сплавов изготавливается большое количество элементов ГТД. Традиционно переплав титановых сплавов для авиационной техники проводят в вакууме, для сварки и наплавки применяется лазерная и дуговая сварка в среде защитных газов, а также электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Применительно к производству авиационных деталей из титановых сплавов предпочтительно приме-

нять 3D наплавку на основе электронно-лучевых технологий, позволяющую изготавливать практически любые компоненты ГТД с обеспечением высокоэффективной вакуумной защиты расплавленного металла сварочной ванны. На сегодня существует ряд технических решений [3], которые показывают возможность изготовления титановых изделий с применением ЭЛС. Однако применяемые в данных установках расходные материалы — порошки титановых сплавов — имеют ряд недостатков. К ним можно отнести несоответствие составов порошковых материалов большому количеству сертифицированных сплавов для стран СНГ, высокую стоимость — более \$ 500 за 1 кг порошка, 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 ЭЛС процессов с применением отечественных порошковых материалов.

С точки зрения технологии ЭЛС отечественные производители имеют богатый опыт сварки и наплавки титановых сплавов, в том числе со сложной многокоординатной системой перемещения электронно-лучевых пушек и наплаваемых деталей [3–7]. Это создает предпосылки к разработке собственных машин на основе электронно-лучевых технологий. Вопрос применения титановых порошковых материалов отечественного производства можно решить, если использовать неферрические порошки титановых сплавов на основе

технологий гидрирования-дегидрирования (НДН) [6]. ГП «ГНИП Институт титана» совместно с НИЦ «Титан Запорожья» ЗНТУ предлагает инновационную технологию производства порошков титана низкой себестоимости методом гидрирования-дегидрирования из титана губчатого или других титаносодержащих материалов различного качества и фракционного состава [8].

В этом направлении решены вопросы обеспечения необходимых химических и гранулометрических составов порошков, показана возможность их серийного производства в Украине, что позволяет сформировать стоимость этих материалов на уровне \$ 100 за 1 кг порошка. Однако остаются открытыми вопросы применения данных порошковых материалов для аддитивных процессов.

Титан является химически активным металлом. Электронно-лучевые технологии в вакуумной камере обеспечивают надежную защиту расплавленного и остывающего металла, поэтому представляются наиболее перспективными для разработки технологии непосредственного создания металлических изделий из титана методами 3D наплавки [5].

Серийно выпускаемых для этих целей установок отечественной разработки не существует. Зарубежные производители поставляют технологию «под ключ», что не обеспечивает гибкости производства с возможностью замены сырья на аналоги [7]. Основным сдерживающим фактором промышленного развития аддитивных технологий для изготовления и ремонта деталей ГТД в Украине является высокая стоимость порошков [1], поэтому перспективным является применение отечественных порошков титановых сплавов.

Целью настоящей работы является изучение возможности применения порошков титановых сплавов отечественного производства для изготовления изделий заданной формы методом аддитивной электронно-лучевой плавки.

Для изготовления изделий применялся неферрический порошок титанового сплава ВТ1-0, предоставленный НИЦ «Титан Запорожья» ЗНТУ.

Материалы и методика исследований. Работу 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 для ЭЛС. Оборудование и программное обеспечение разработано в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Общий вид оборудования представлен на рис. 1.

Установка состоит из малогабаритной вакуумной камеры 1, в которой установлен передвижной стол, с закрепленной оснасткой 3 для выращивания изделия. На вакуумной камере расположена электронно-лучевая пушка 2. Вакуумная система

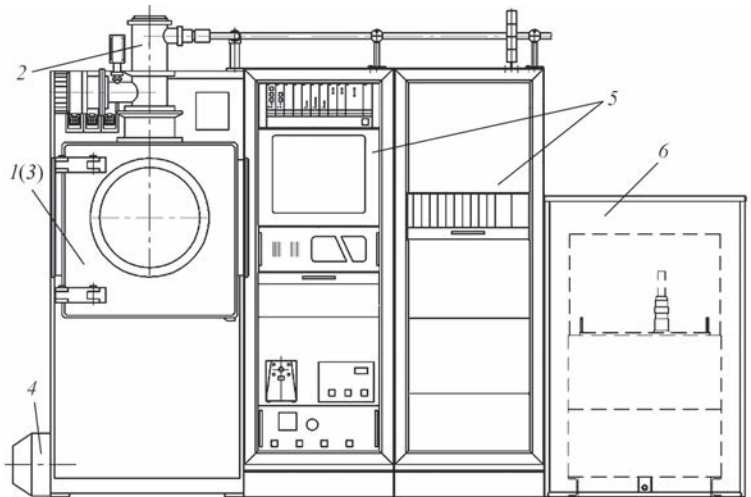


Рис. 1. Схема установки СВ-212М (описание 1–6 см. в тексте)

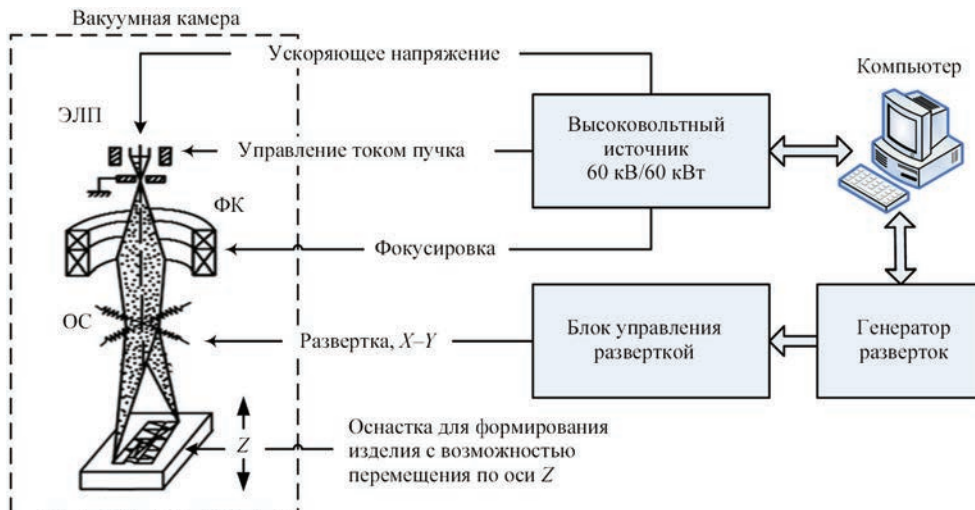


Рис. 2. Блок-схема оборудования для аддитивной электронно-лучевой наплавки: ЭЛП — электронно-лучевая пушка; ФК — фокусирующая катушка ЭЛП; ОС — отклоняющая система ЭЛП

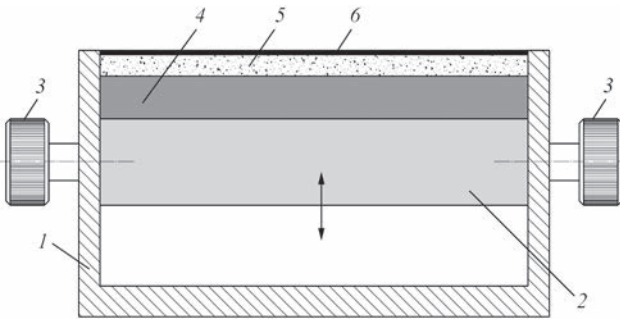


Рис. 3. Схема модуля для 3D наплавки (описание 1–7 см. в тексте); стрелкой указано направление перемещения стола

установки (поз. 4) обеспечивает величину вакуума в камере менее 10^{-4} Торр. В шкафах управления 5 находятся промышленный компьютер, монитор, блоки управления высоковольтным источником и вакуумной системой. Высоковольтный источник 6 позволяет получить регулируемое напряжение до 65 кВ и ток пучка до 1 А.

Блок-схема оборудования для аддитивной электронно-лучевой наплавки представлена на рис. 2.

Пучок электронов, необходимый для нагрева поверхности с нанесенным металлическим порошком, формируется в электронно-лучевой пушке (ЭЛП), которая питается 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. В блоке управления разверткой эти сигналы усиливаются и поступают на отклоняющие катушки ЭЛП. 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 (рис. 3).

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 $100 \times 15 \times 50$ 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 [9]. Модуль состоит из корпуса 1 и стола 2, перемещаемого по вертикали. Стол передвигается в вертикальном направлении, при этом его положение фиксируется винтами 3. На столе установлена титановая подложка 4, на которой послойно наращивается изделие 5. Порошок на подложку наносится с помощью дозатора. Излишки удаляются скребком, после чего, при необходимости, слой уплотняется специальным формующим устройством. При этом формируется гладкая поверхность с равномерно распределенным слоем порошка 6. Перед нанесением последующего слоя стол опускается на заданную величину, которая контролируется микрометром часового типа. При этом расстояние между катодом ЭЛП и поверхностью зоны плавки оста-

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

Фракция, мкм	Плотность, г/см ³	Содержание примесей, мас. %					
		N	C	H	Fe	Si	O
100...160	1,7	≤0,05	≤0,1	0,012	≤0,3	≤0,15	≤0,15
63...100	1,8	≤0,05	≤0,1	0,012	≤0,3	≤0,15	≤0,15

на заданную величину, которая контролируется микрометром часового типа. При этом расстояние между катодом ЭЛП и поверхностью зоны плавки оста-

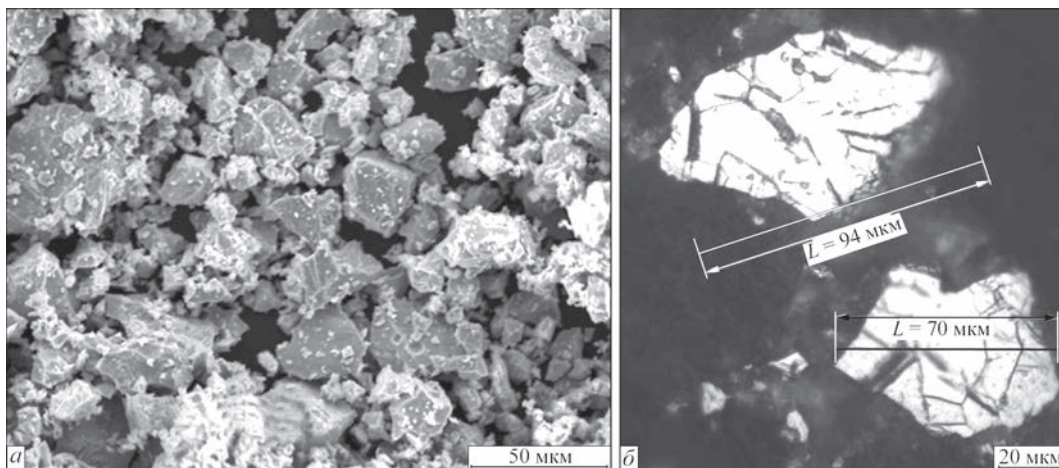


Рис. 4. Внешний вид (а) и микроструктура (б) порошков BT1-0 HDH фракции 63...100 мкм, применяемых для наплавки

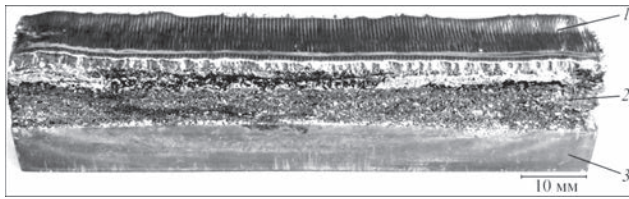


Рис. 5. Образец изделия, изготовленный методом электронно-лучевой 3D-наплавки: 1 — верхний слой наплавленного металла; 2 — промежуточный слой металла с частицами нерасплавленного порошка; 3 — подложка из титана

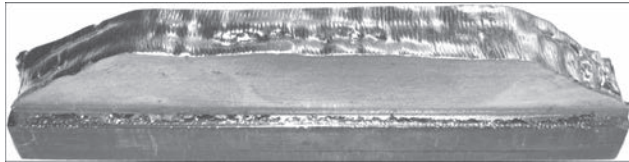


Рис. 6. Изделие после механической обработки
 ется фиксированным и не изменяется в процессе создания всей детали.

Процесс электронно-лучевой плавки 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. После проведения плавки камера открывается и наносится следующий слой порошка. Деталь выращивается послойно.

В качестве порошковых материалов применяли титановые HDH порошки, представляющие собой гранулы несферической формы титанового сплава BT1-0 с литой микроструктурой частиц (рис. 4).

Технологические характеристики и химический состав порошковых материалов HDH титана BT1-0 приведены в таблице.

В сплавлении порошков по приведенной выше схеме получены образцы изделий заданной прямолинейной формы размерами $12 \times 12 \times 100$ мм (рис. 5).

На фотографии 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

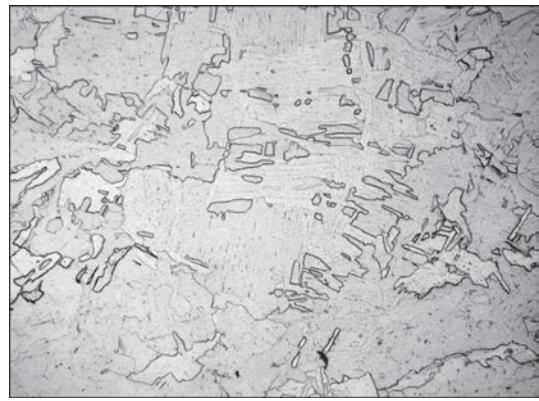


Рис. 8. Микроструктура ($\times 100$) наплавленного металла у линии сплавления

обрабатывается. После отработки режимов наплавки, учитывающих фракцию порошка, величину слоя и размер перекрытия слоев, получены образцы для дальнейших исследований. На рис. 6 представлено изделие после механической обработки. Поверхность наплавленного металла обработана фрезерованием. Структура металла однородная, без видимых повреждений и включений.

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

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. 7).

В дальнейшем проведены исследования микроструктуры в различных зонах образцов, полученных из порошков фракции 63...100 мкм. Литая структура у линии сплавления с подложкой отличается размерами и конфигурацией пластин α -фазы. В первых слоях наплавленного металла они крупнее и имеют более полиэдрическую фор-

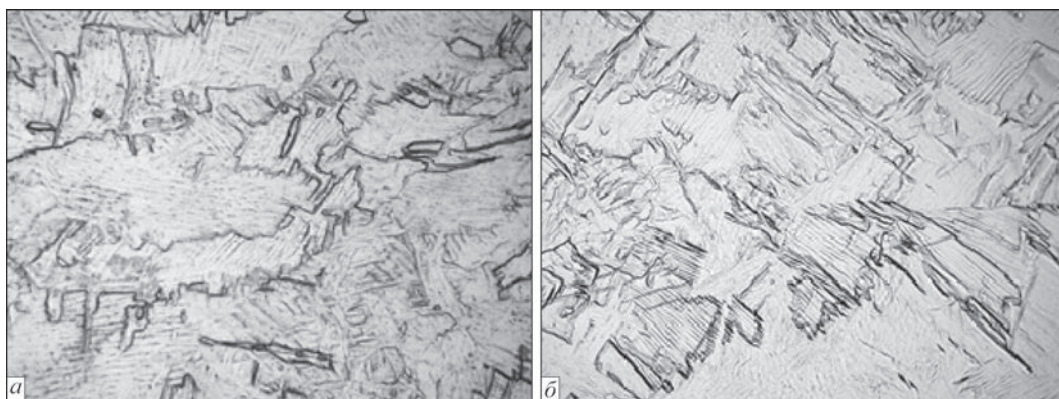


Рис. 7. Микроструктура ($\times 200$) металла в центре слоя: а — слой до 100 мкм; б — слой более 100 мкм

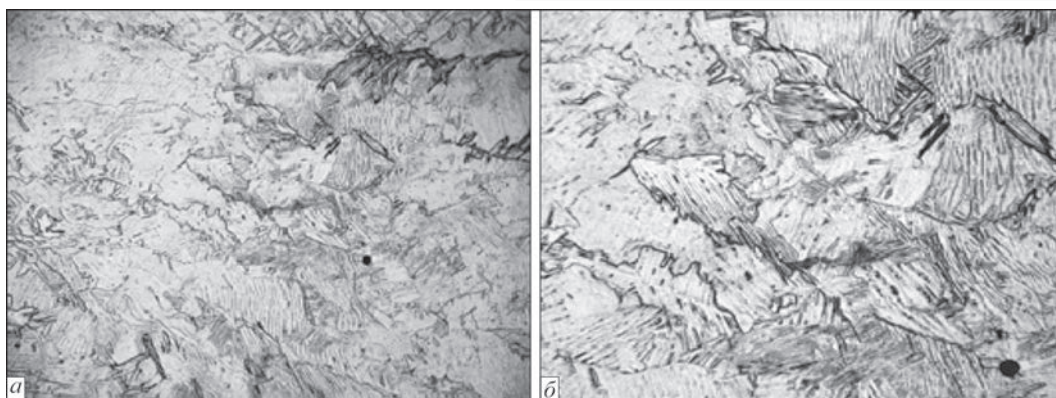


Рис. 9. Микроструктура наплавленного металла в верхней части образцов: *a* — $\times 100$; *б* — $\times 200$



Рис. 10. Микроструктура ($\times 100$) металла внешних слоев наплавки

му, чем в средней части и на последних слоях наплавки (рис. 8, 9). Это связано со скоростью охлаждения: при малых скоростях образуются более крупные пластины, а при высоких формируется мелкоигльчатая α' -структура.

На внешних слоях наплавленного металла пластины вытянуты в направлении теплоотвода с зазубренными границами (рис. 10).

Переходные зоны слоев наплавленного металла отличаются некоторым измельчением пластин и увеличением количества игльчатой α' -фазы (рис. 11).

В структуре исследуемого образца не обнаружено дефектов: пор, несплавлений.

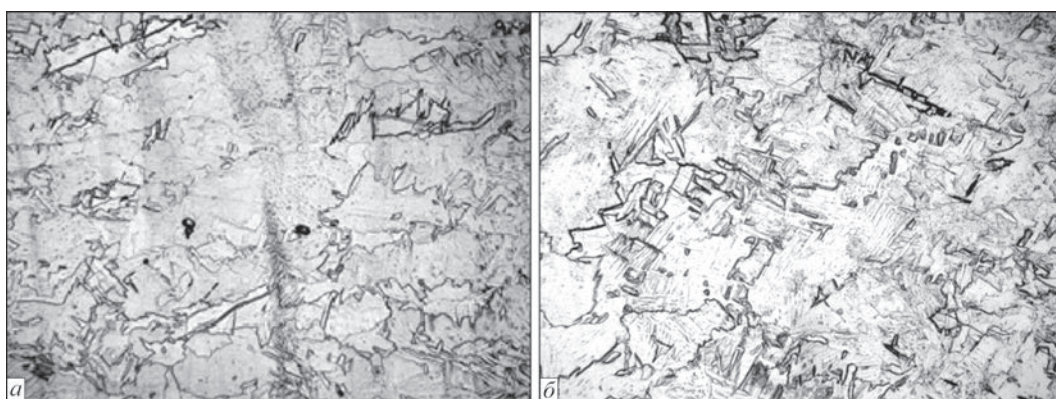


Рис. 11. Микроструктура наплавки в центральной части образцов: *a* — $\times 200$; *б* — $\times 100$

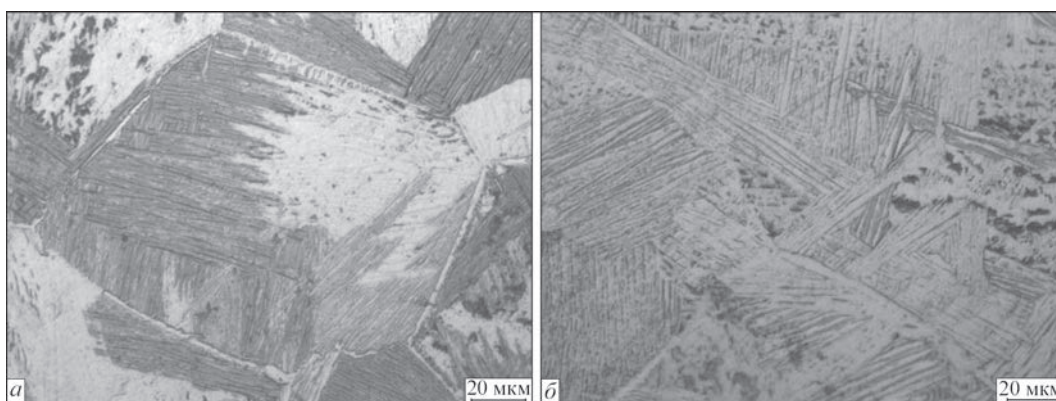


Рис. 12 Микроструктура слоев: *a* — слой 350; *б* — 120 мкм

Микроструктура слоев наращиваемого металла представлена на рис. 12.

Как следует из анализа микроструктур слоев наращиваемого металла, в структуре образца формируются характерные структурные зоны, размер которых зависит от их положения по высоте наплавки.

Выводы

1. 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.

2. Разработаны элементы техники и реализована возможность изготовления деталей заданной формы с применением аддитивных процессов методом электронно-лучевого послойного наращивания с использованием HDH порошков, которые позволяют получить плотную литую структуру наплавленного металла.

1. Петрик И. А., Овчинников А. В., Селиверстов А. Г. Разработка порошков титановых сплавов для аддитивных технологий применительно к деталям ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8. – С. 11–16.
2. Разработка отечественных аддитивных технологий изготовления и контроля ответственных деталей машиностроения / И. Ю. Смуров и др. – Реферат-презентация. ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН».
3. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко и др.; под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
4. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатным перемещением пушки и изделия / Б. Е. Патон и др. // *Автоматическая сварка*. – 2004. – С. 3–7.

5. 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей / С. В. Ахонин и др. // Там же. – 2016. – № 5-6. – С. 141–144.
6. Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану / О. М. Івасишин та ін. // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2011. – Т. 12, № 4. – С. 900–907.
7. Жуков В. В., Григоренко Г. М., Шаповалов В. А. Аддитивное производство металлических изделий (Обзор) // *Автоматическая сварка*. – 2016. – № 5-6. – С. 148–153.
8. Производство порошков из гидрированного губчатого титана // Сайт ГП «ГНИП Институт титана» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://timag.org/ru_propose.php-25.01.2017
9. Уплотняемость порошковых материалов с различной формой частиц / В. Е. Ольшанецкий и др. // *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. – 2015. – № 1. – С. 130–133.

В. М. Нестеренков¹, В. А. Матвійчук¹,
М. О. Русиник¹, О. В. Овчинников²

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua
²Запорізький нац. техн. ун-т.
09063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.
E-mail: iaov@rambler.ru

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ПОРОШКІВ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ1-0

Досліджено можливість застосування гідровано-дегідрованих (HDH) порошків титану вітчизняного виробництва для виготовлення виробів методом адитивної електронно-променевої плавки на установках типу СВ-212М. Для досліджень застосовувався порошок з гідровано-дегідрованого технічно чистого титану марки ВТ1-0. Розроблено елементи техніки виготовлення деталей методом пошарового 3D наплавлення. Отримано і досліджено зразки виробів заданої форми розміром 12×12×100 мм. Вивчено структури наплавлених шарів. Відзначено відсутність пористості і несплавлення в отриманих зразках виробів. Показана можливість створення деталі заданої форми із застосуванням методів адитивного електронно-променевого наплавлення з використанням порошку титанового сплаву ВТ1-0 вітчизняного виробництва. Бібліогр. 9, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: електронний промінь, шар, адитивна технологія, порошок титановий, структура

Поступила в редакцію 06.02.2017

18-я Международная выставка «СВАРКА WELDING 2017»



Во время работы выставки будет представлен серийный самоходный агрегат лазерной сварки САЛС-1, предназначенный для решения производственных задач в условиях трассового строительства для предприятий нефтегазовой отрасли. Эта уникальная сварочная технология на основе волоконных лазеров разработана НТО «ИРЭ-Полюс» и НПК «УТС ИНТЕГРАЦИЯ».

<http://welding.expoforum.ru>