

УДК 669.295

И. А. ПЕТРИК¹, А. В. ОВЧИННИКОВ², А. Г. СЕЛИВЕРСТОВ¹¹ АО «Мотор Сич»,² НИЦ «Титан Запорожье», Запорожье, Украина

РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДЕТАЛЯМ ГТД

Рассмотрены преимущества применения аддитивных технологий в машиностроении и их эффективность в авиадвигателестроении. Показано, что основными сдерживающими факторами внедрения аддитивных технологий в отечественном авиадвигателестроении для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД) являются высокая себестоимость производства порошков и отсутствие порошков из титановых сплавов требуемого химического состава. Представлена технологическая схема получения заготовок из титановых сплавов с заданным химическим составом и равномерным распределением легирующих элементов, а также схема получения порошков из титановых сплавов с заданным химическим составом и размером частиц для аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивное производство, титановые сплавы, легирование, порошки, технология.

Введение

Одним из наиболее активно развивающихся направлений изготовления деталей ГТД сложной конфигурации из титановых сплавов являются аддитивные технологии (от английского Additive Fabrication или Additive Manufacturing - AM) [1].

Детали изготавливают путем формирования слоя материала, с последующим отверждением и фиксацией этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения САД-модели. Основные преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными способами получения изделий заключаются в следующем:

- высокий коэффициент использования материала более 95%;
- возможность изготовления деталей сложной конфигурации, в том числе с внутренними полостями;
- возможность изменения геометрии деталей в процессе изготовления;
- восстановление геометрии изношенных деталей;
- отсутствие дорогостоящей оснастки.

Для изготовления деталей методами AM в качестве расходного материала преимущественно применяются порошки с необходимыми параметрами: химический состав, размеры и сферическая форма частиц. Необходимые размеры частиц и сферическую форму порошков титановых сплавов получают при помощи разнообразных технологий атомизации, которые основаны на процессах распыления металла из расплавленной титановой заготовки [2].

Наиболее распространенными зарубежными титановыми сплавами, применяемыми для аддитивного производства, являются сплавы с системой легирования титан-алюминий-ванадий типа (Grade5, SAT-64, T-A6V, Ti-Al-V) – аналоги ВТ6, со средним содержанием алюминия на уровне 6 % и ванадия – 4 % [1,3]. Однако детали отечественных ГТД, кроме материала ВТ6, изготавливаются из сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 и др. В настоящий момент порошки из сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 практически не производятся. Соответственно, основными сдерживающими факторами промышленного развития AM технологий для изготовления и ремонта деталей ГТД в Украине являются высокая стоимость порошков и отсутствие порошков из отечественных титановых сплавов.

Целью данной работы являлась разработка схемы получения легированных порошков отечественных титановых сплавов для AM – технологии применительно к деталям ГТД.

1. Экспериментальная часть

Работы проводили на примере материалов ВТ3-1. Достижение поставленной цели в работе осуществляли путем решения следующих последовательных задач:

1) получение заготовок титановых сплавов с заданным химическим составом и равномерным распределением легирующих элементов;

2) получение легированных порошков титана с заданным химическим составом, размерами и формой частиц по промышленно воспроизводимой технологии.

2. Получение легированных заготовок

Заготовки титановых сплавов требуемого химического состава с равномерным распределением легирующих элементов получали по ранее разработанной совместно с ГП "ГНИИП Институт титана" технологии, которая предусматривает легирование в процессе магнийтермического восстановления и вакуумной сепарации блока легированного губчатого титана [4].

Анализ химического состава образцов титана, полученного по разработанной технологии легирования, показал его соответствие по содержанию основных элементов сплаву ВТ-3-1 (ГОСТ 19807 – 91).

Результаты рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) также подтвердили наличие легирующих элементов в структурных составляющих титана (рис. 1 и 2).

Большому содержанию элемента соответство-

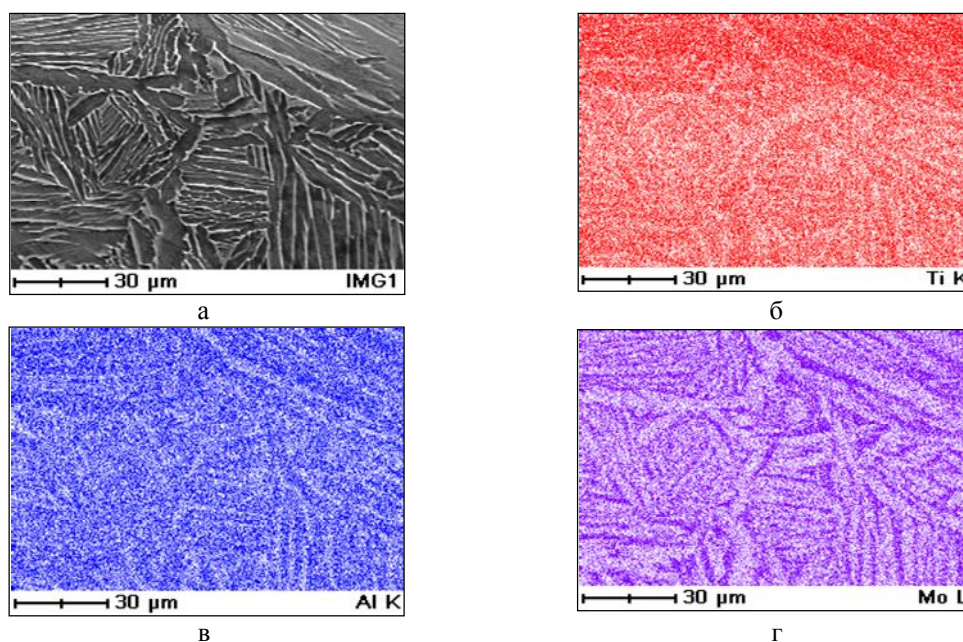


Рис. 1. Результаты энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа распределения легирующих элементов в опытных титановых заготовках:
а - микроструктура материала в месте исследования; б - распределение Ti;
в - распределение Al; г - распределение Mo

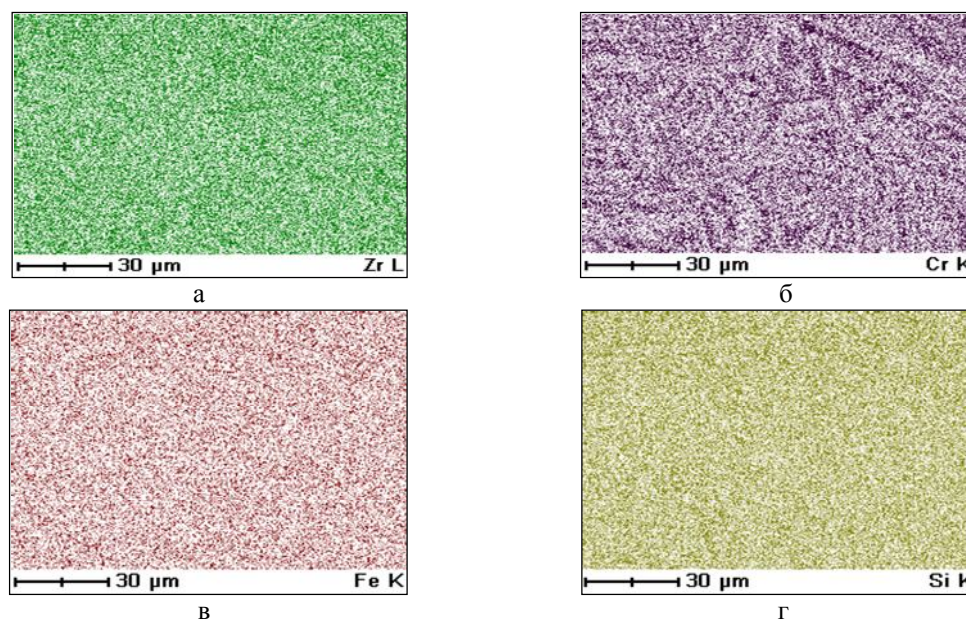


Рис. 2. Результаты энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа распределения легирующих элементов в опытных титановых заготовках:
а - Zr; б - Cr; в - Fe; г - Si

вали более интенсивный цвет относительно линии сканирования. Из приведенных данных можно сделать вывод, что основные легирующие элементы равномерно распределены в структуре образца и не образуют химических неоднородностей. Таким образом, опытные титановые образцы возможно использовать как заготовку для дальнейшего получения легированных порошков титана.

3. Получение легированных порошков

Вторую задачу – получение порошков титановых сплавов заданного химического состава и размеров частиц – решали путем измельчения полученного легированного титана.

Измельчение или дробление легированного титана проводили при помощи метода термохимического охрупчивания посредством водорода (метод

гидрирования-дегидрирования, HDH [5]). Для этого на конструктивно модернизированной установке гидрирования отработаны режимы насыщения водородом легированного титана губчатого и последующих процессов дробления, рассева и дегидрирования.

В результате получены HDH порошки легированного титана BT3-1, химический состав и содержание примесей в которых представлены в таблицах 1 и 2.

Как следует из анализа данных, приведенных в таблице 1, согласно химическому составу, порошок, изготовленный по опытной технологии, по всем элементам соответствует стандартному сплаву BT3-1, а также практически не уступает по примесям порошкам, полученным на установках атомизации. Характеристики порошковых материалов из титановых сплавов, применяемых для аддитивных технологий, представлены в таблице 3 [6].

Таблица 1

Химический состав сплавов полученных по экспериментальной технологии

| Материал | Содержание элементов, % | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|------|------|------|------|
| | Al | Mo | Cr | Fe | Si |
| Титан легированный опытный (BT3-1) | 6,25 | 2,34 | 1,17 | 0,32 | 0,17 |

Таблица 2

Содержание примесей в сплавах, полученных по экспериментальной технологии и по типовым технологиям

| Материал | Содержание примесей, % | | | | |
|---|------------------------|-------|----------------|------|----------------|
| | N ₂ | C | H ₂ | Fe | O ₂ |
| Титан легированный опытный (BT3-1) | 0,025 | 0,019 | 0,075 | 0,32 | 0,15 |
| HDH порошок BT3-1 по опытной технологии | 0,023 | 0,018 | 0,011 | 0,19 | 0,18 |
| Сплав BT-6 (пруток) | 0,050 | 0,100 | 0,015 | 0,60 | 0,20 |
| Ti-6Al-4V Grade 5 (ASTM B348) (пруток) | 0,050 | 0,080 | 0,015 | 0,40 | 0,20 |
| Ti-6Al-4V PREP*(порошок) | 0,007 | 0,050 | 0,003 | 0,17 | 0,17 |

* Plasma rotating electrode process – процесс диспергирования вращающейся заготовки в плазме

Таблица 3

Характеристики порошковых материалов из титановых сплавов, применяемых для аддитивных технологий

| № | Производитель | Фракция, мкм | Форма частиц | Способ получения | Плотность, г/см ³ |
|---|---|------------------|----------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | ATI Powder Metals | -150+45 | сфера | газовая атомизация (ГА) | - |
| 2 | Raymor Industries Inc. (Pyrogenesis) | -160+45 (250+30) | сфера | плазменная атомизация (ПА) | 2,5 |
| 3 | Baoji Orchid Titanium Industry Co. Ltd. | -210+45 | сфера | PREP | - |
| 4 | TLS Technik GmbH & Co. | -150+53 | сфера | ГА | - |
| 5 | Tekna Plasma Systems Inc | -150+37 | сфероид | ПА | - |
| 6 | Affinity International | -150 | сфера | ГА и PREP | - |
| 7 | Arcam | -106+45 | сфера/ сфероид | ПА | 2,65 |
| 8 | AMETEK, Inc. | -150+45 | сфера/сфероид | Плазменная сфероидизация | - |
| 9 | Опытная технология BT3-1 | -150+50 | несферич. | HDH | 2,71 |

На рис. 3 показан внешний вид порошков титановых сплавов Ti-Al-V, полученных по различным технологиям и из разного исходного сырья.

Исходя из анализа внешнего вида порошков (рис. 3, а) очевидно, что форма порошков, полученных по опытной технологии, является несферической. Частицы порошка имеют несферическую угловатую форму, в связи с чем обладают более низкой сыпучестью. Однако частицы угловатой формы могут обеспечить меньшую пористость порошковых изделий, а также, в отличие от сферических порош-

ков, могут быть более эффективно скомпактированы в холодном состоянии.

В настоящее время есть решения по применению несферических порошков титановых сплавов при изготовлении деталей на 3D принтерах [8], а также возможности сфероидизации дегидрированных порошков [9].

Таким образом, технологическая схема получения легированных порошков титана будет выглядеть следующим образом (рис. 4).

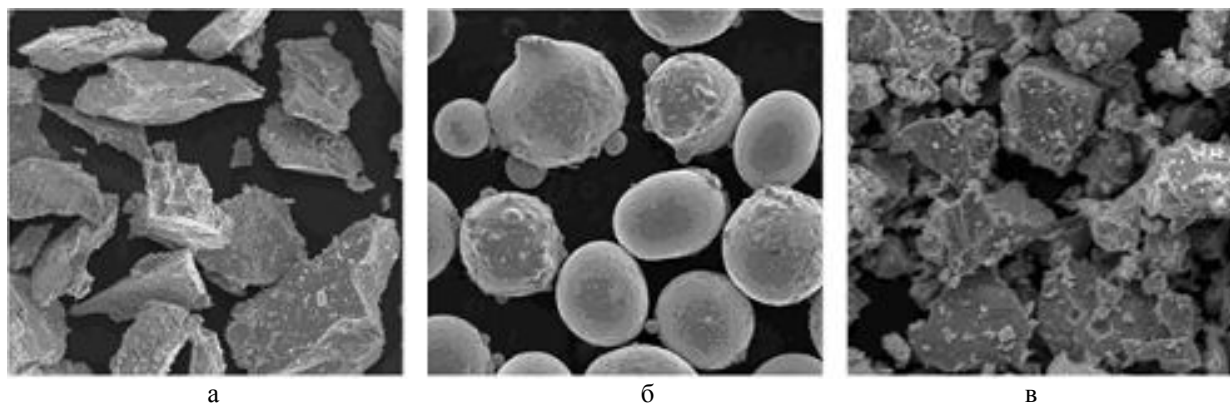


Рис. 3. Микроструктура (x200) порошков титана и сплавов на его основе:
а – порошок, полученный методом HDH из слитка, выплавленного при помощи вакуумно-дуговой плавки (ВДП) [7]; б – сферический порошок, полученный методом газовой атомизации;
в – порошок, полученный по опытной технологии HDH состава BT3-1

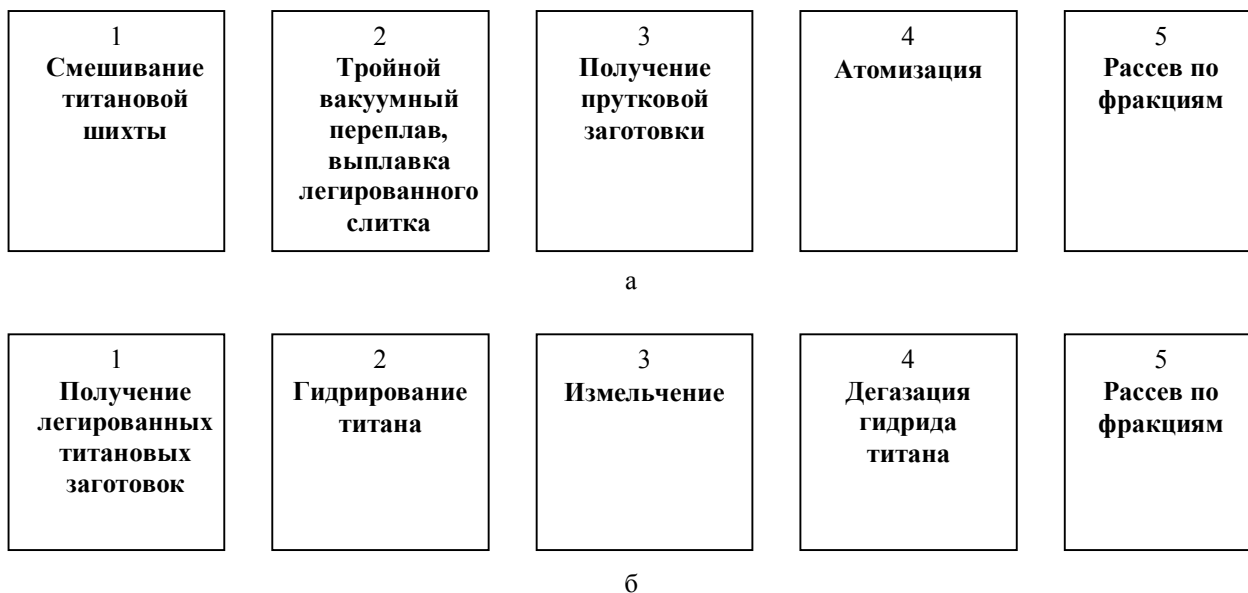


Рис. 4. Схемы получения легированных порошков титана для аддитивных технологий:
а – традиционная схема изготовления порошков; б – опытная схема изготовления порошков

Как следует из анализа данных, приведенных на рис. 4, технологическая схема позволяет исключить дорогостоящие и сложные операции - производство прутковых заготовок из титановых сплавов, смешивание титановой шихты с лигатурами, вакуумные переплавы, выплавку слитков, атомизацию в специальных сложных устройствах – атомизаторах, а также обеспечить возможность производства порошков на базе существующего промышленного оборудования.

Таким образом, в настоящей работе показана возможность получения в условиях Украины порошковых материалов, которые имеют химический состав, соответствующий авиационным материалам, в частности сплаву ВТЗ-1.

Полученные порошки титана могут быть использованы в производстве при изготовлении и ремонте деталей авиационных ГТД из материалов, соответствующих стандартам Украины, с применением аддитивных технологий, а именно 3D печати для «Bed deposition» - процесса селективного сплавления и при использовании технологии сферо-идизации порошка для «Direct deposition» - процесса непосредственной подачи порошка в место наплавки.

Заключение

1. Разработана технология получения порошков легированного титана системы Ti-Al-Mo-Cr-Zr-Fe (сплав ВТЗ-1). Показано, что в порошках обеспечивается равномерное распределение легирующих элементов и регламентированное содержание примесей;

2. Предложенная технология получения легированного титана позволяет исключить затратные и технологически сложные операции - вакуумные переплавы, выплавки слитков, атомизацию сплавов.

3. Разработанная технологическая схема получения порошков легированного титана для АМ-технологий обеспечивает получение частиц порошков с размерами, аналогичными импортным порошкам для аддитивных технологий и химический состав порошков, соответствующий отечественным сплавам, применяемым для изготовления деталей ГТД.

4. Предложенная технология позволяет производить порошки титановых сплавов системы Ti-Al-Mo-Cr-Zr-Fe и др. на базе существующего промышленного оборудования.

Литература

1. Довбыш, В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла [Текст] / В. М. Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зленко // Библиотечка литейщика. – 2014. – № 9. – С. 14-71.
2. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутьлина. – СПб. : Издательство политехнического университета, 2013. – 221 с.
3. Терновой, Ю. Ф. Полуфабрикаты и изделия из распыленных металлических порошков [Текст] / Ю. Ф. Терновой, Н. Н. Пашиетнева, С. А. Воденников. – Запорожье : Изд-во Запорожской государственной инженерной академии, 2010. – 180 с.
4. Янко, Т. Б. Дослідження хімічного складу та мікроструктури губчастого титану, отриманого за технологією комплексного легування алюмінієм та ванадієм [Текст] / Т. Б. Янко // Зб. наук. праць НТУ «ХПИ». – Вип. № 11 (1120). – Х., 2015. – С. 212-220.
5. Водородная технология титановых сплавов [Текст] / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов [и др.]. – М. : МИСИС, 2002. – 392 с.
6. William, P. Forging of Powder Metallurgy Processed Ti-6Al-4V [Electronic resources] / P. William // Titanium 2012, October 7-10, Atlanta, Georgia, USA. – Access: http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/Peter_William_2012.pdf. – 2.05.2015.
7. Colin, Dr. Manufacture of HDH Low Oxygen Titanium-6Aluminium-4Vanadium (Ti-6-4) Powder Incorporating a Novel Powder De-Oxidation Step [Electronic resource] / Dr. Colin, G. McCracken, Dr. James // Euro PM2009. Congress Technical Presentations on Powder Manufacture & Processing. – Access: http://www.epma.com/doc_details/270-powder-manufacture-processing. – 2.05.2015.
8. 3D Systems представляет новейшую установку для печати металлами [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d-systems-introduces-the-latest-installation-for-printing-on-metals/>. – 2.05.2015.
9. MetalYSIS – Titanium [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metalYSIS.com/titanium>. – 2.05.2015.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., И. П. Волчок, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

**РОЗРОБКА ПОРОШКІВ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ
ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СТОСОВНО ДО ДЕТАЛЕЙ ГТД**

І. А. Петрик, О. В. Овчинніков, О. Г. Селіверстов

Розглянуто переваги застосування адитивних технологій в машинобудуванні та їх ефективність в авіадвигунобудуванні. Показано, що основними стримуючими факторами впровадження адитивних технологій у вітчизняному авіадвигунобудуванні для виготовлення деталей ГТД є висока собівартість виробництва порошків та відсутність порошків з титанових сплавів необхідного хімічного складу. Представлено технологічну схему отримання заготовок з титанових сплавів із заданим хімічним складом і рівномірним розподілом легуючих елементів, а також схему отримання порошків з титанових сплавів із заданим хімічним складом і розміром частинок для адитивних технологій.

Ключові слова: адитивне виробництво, титанові сплави, легування, порошки, технологія.

**DEVELOPING POWDERS OF TITANIUM ALLOYS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES
AS APPLIED TO GAS TURBINE ENGINE PARTS**

I. A. Petrik, A. V. Ovchinnikov, A. G. Seliverstov

Advantages of additive technologies in mechanical engineering and their effectiveness in the aircraft engine. It is shown that the main constraints to the implementation of additive technologies in the domestic aviation for the manufacture of turbine engine parts are high cost of production powders and the lack of powders of titanium alloys required chemical composition. The technological scheme of obtaining billet of titanium alloys with specified chemical composition and uniform distribution of alloying elements, as well as the scheme of obtaining powders of titanium alloys with a given chemical composition and particle size for additive technologies.

Key words: additive manufacturing, titanium alloys, alloying, powders, technology.

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

Овчинников Александр Владимирович – д-р техн. наук, проф. каф. «Механика», ЗНТУ, Запорожье, Украина

Селиверстов Александр Георгиевич – начальник бюро сварки, АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com