

УДК 669.295

П. Д. ЖЕМАНЮК<sup>1</sup>, Ю. Ф. БАСОВ<sup>1</sup>, А. В. ОВЧИННИКОВ<sup>2</sup>,  
А. А. ДЖУГАН<sup>2</sup>, А. В. МИХАЙЛЮТЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## ПРИМЕНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ ПОРОШКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ (NDH2) В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

*Аддитивные технологии являются перспективным направлением в развитии таких отраслей промышленности как высокоточное машиностроение и авиадвигателестроение. В то же время высокая себестоимость процесса 3D печати и отсутствие альтернативного (импортному порошку) сырья препятствует широкому распространению указанных технологий. В данной работе показана принципиальная возможность использования более дешевых порошковых материалов на основе титана с несферической формой частиц, получаемых по технологии гидрирования-дегидрирования и с частичками сферической формы, полученных по технологии плазменного распыления, предназначенных для изготовления объемных изделий различными методами аддитивных технологий.*

**Ключевые слова:** аддитивное производство, титановые сплавы, легирование, порошки, модель, конструкция, технология, структура

### Введение

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

Изделия изготавливают путем формирования слоя материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения САД-модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим [2].

Основные преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными способами получения изделий из конструкционных металлов заключаются в следующем:

- высокий коэффициент использования материала до 95...97 %;
- возможность изготовления деталей сложной конструкции и изменения геометрии деталей в процессе изготовления, в том числе с внутренними полостями [1];
- изготовление композиционных деталей со структурой разного типа;
- восстановление изношенных деталей.

Таким образом, технологии AM объединяют в себе не только преимущества порошковой металлургии, такие как высокий (более 0,9) коэффициент использования материала, но и преимущества литейного производства, такие как получение деталей сложной формы и различной конфигурации с плотной литой структурой. Важным технологическим преимуществом новых технологий является воз-

можность быстрого изменения геометрии производимого изделия и отсутствие дорогостоящей оснастки, которая является неотъемлемой частью традиционных технологий.

Не менее важным преимуществом новых технологий является возможность получения деталей сложной конфигурации и геометрии.

Перечисленные выше преимущества аддитивных технологий способствуют их интенсивному внедрению в высокотехнологические области промышленности: авиакосмическую, автомобилестроительную, химическую, производство медицинского оборудования, имплантологию и др. В данных областях широко используются конструкционные материалы, обладающие высоким уровнем комплекса механических и служебных свойств. К числу таких материалов относится титан и сплавы на его основе. Наиболее распространенными титановыми сплавами, которые используются в аддитивных производствах, являются сплавы с системой легирования Ti-Mo-Al-V-Zr.

На сегодняшний день достигнут определенный уровень развития AM способов изготовления деталей из титановых сплавов, которые позволяют вывести технологии «добавления» на промышленный уровень взамен устаревающих технологий «отнимания». Одним из основных сдерживающих факторов промышленного развития AM технологий является высокая стоимость и ограниченные объемы производства расходных материалов - качественных порошков титановых сплавов. Таким образом, вопросы, связанные с расходными материалами для адди-

тивных технологий, требуют отдельного рассмотрения.

Необходимый химический состав и стабильность механических свойств, в применяемых в настоящее время порошках титановых сплавов, достигается за счет использования для распыления порошков заготовки высокого качества. Как правило, в качестве распыляемой заготовки применяют деформируемые прутки из титановых сплавов требуемого химического состава. Сама заготовка имеет низкий КИМ и является конечным продуктом сложных технологических операций металлургического и термомеханического переделов, значительная часть которых направлена на усреднение химического состава и получение равномерного распределения легирующих элементов. Получение заданного химического состава является одной из наиболее сложных проблем при получении высококачественных легированных титановых порошков для нужд аддитивных технологий.

Другими важными показателями порошков титановых сплавов, применяемых в АМ технологиях, является их фракционный состав и форма. По сути, порошки титана представляют собой частицы сплава титана сферической формы, что в ряде источников называются гранулами [3]. Такой гранулометрический состав и форма порошков обусловлены необходимостью компактно укладываться в определенный объем и требованиями по «текучести» порошковых композиций в системах подачи материала [4].

Размеры и сферическую форму порошков титановых сплавов получают при помощи разнообразных технологий атомизации, которые основаны на процессах распыления металла из расплавленной титановой заготовки [5, 6].

В конечном итоге, стоимость легированных порошков титана в результате существующих технологических переделов колеблется в диапазоне \$200...400 за килограмм (в некоторых случаях \$1000), что формирует изначально высокую стоимость деталей, полученных АМ технологиями [7].

Для решения двух основных проблем – снижения стоимости и упрощения технологии производства легированных порошков титановых сплавов, при сохранении приведенных выше требований к ним – необходимо усовершенствовать существующие АМ технологии, а также внедрять новые высокоэффективные технологии производства сплавов и порошков.

Целью данной работы являлось получение прототипов деталей ГТД для оценки перспектив применение аддитивных процессов и исследование перспективных титановых порошковых материалов применяемых для их производства.

## Результаты исследований и их обсуждение

Для оценки технологической реализации новых конструктивных решений разработана 3D модель диффузора компрессора высокого давления ГТД. По разработанной модели изготовлены прототипы изделий из полимерных порошковых материалов (рис. 1).

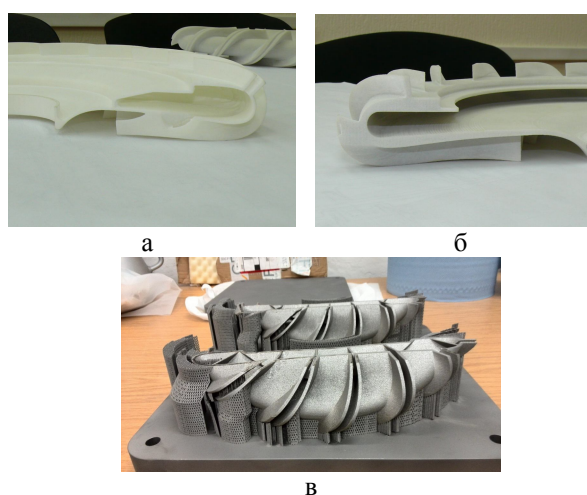


Рис. 1. Вид моделей диффузора компрессора высокого давления ГТД из порошковых материалов с различной конструкцией: сечение детали, полученной по традиционной технологии (а), сечение детали, полученной по новой аддитивной технологии (б), деталь, полученная по аддитивной технологии из металла (в)

Из анализа конструкции приведенных выше изделий установлено, что новая геометрия обеспечивает более жесткую конструкцию за счет технологической возможности изготовления во внутренних полостях ребер жесткости. Основным преимуществом изделия, полученным по аддитивной технологии, является существенное до 30% снижение массы детали.

Это дает основание сделать вывод, что изготовление данного изделия из металлических, в частности титановых, порошковых материалов обеспечит те же преимущества с сохранением прочностных и служебных свойств такого рода деталей. Однако, этого можно достичь при условии обеспечения требуемого уровня механических свойств конструкционного материала, что можно реализовать за счет применения порошковых материалов со специальными системами легирования. Учитывая специфику процессов 3D печати сопряженных с расплавлением порошков и быстрым охлаждением сплавов необходимо использовать литейные или свариваемые материалы, обеспечивающие необходимый уровень механических и служебных свойств. Для изготовле-

ния деталей ГТД производимых на АО «Мотор Сич» к числу таких сплавов относятся псевдо  $\alpha$ -титановые сплавы типа BT20 с системой легирования Ti-Mo-Al-V-Zr. Из данных сплавов на сегодняшний день не производят порошковые материалы. Применительно к оборудованию для послойного наращивания деталей такого рода материалы имеют свою специфику. Анализ зарубежных и отечественных порошков титана и порошков на основе его сплавов показал, что их характеристики и стоимость существенно ограничивают возможности производства деталей ГТД из титановых сплавов. Так ориентировочная стоимость изделий, полученных на 3D принтере из различных порошковых материалов, приведена на рис. 2.

Как следует из анализа приведенных данных производство изделий по новым технологиям становится экономически сопоставимым с традиционными технологиями литья и механической обработки при стоимости порошков не более 200 долл./кг.

Поэтому для расширения номенклатуры деталей, производимых по аддитивным технологиям, необходимо разрабатывать порошковые материалы более широкого спектра химических и фракционных составов по технологиям, обеспечивающим существенное снижение их стоимости.

Достижение поставленной цели в работе осуществляли путем получения легированных порошков титана с заданным химическим составом и размерами по промышленно воспроизводимой технологии.

Дезинтеграцию или дробление легированного губчатого титан проводили при помощи метода

термохимического охрупчивания посредством водорода (метод гидрирования-дегидрирования, HDH). Для этого на конструктивно модернизированной установке гидрирования отработаны режимы насыщения водородом легированного титана губчатого и последующих процессов дробления, отсева и дегидрирования. [8]

В результате получены HDH порошки легированного титана (Ti-Mo-Al-V-Zr), химический состав которых представлен в таблице 1.

Как следует из анализа данных, приведенных в табл. 1, согласно химическому составу, порошок, изготовленный по опытной технологии, по всем элементам соответствует марочному сплаву BT20.

Из рис. 3 видно, что форма порошков, полученных по технологии HDH, является несферической. Частицы порошка имеют угловатую форму, в связи с чем обладают невысокой текучестью [10].

На рис. 3 показаны структуры порошков титановых сплавов Ti-Mo-Al-V-Zr, полученных по разным технологиям и из разного исходного сырья.

Однако, частицы угловатой формы могут обеспечить меньшую пористость порошковых изделий, а также, в отличие от сферических порошков, могут быть скомпактированы в холодном состоянии [11]. Процесс печати обеспечивает переплав порошков, поэтому их форма не влияет на геометрию конечного изделия. Основное влияние форма порошка оказывает на схему его подачи в рабочую камеру. В настоящее время есть решения по применению несферических порошков титановых сплавов при изготовлении деталей на 3D принтерах [12, 13], а также возможности сфероидизации дегидрированных порошков [7, 14].

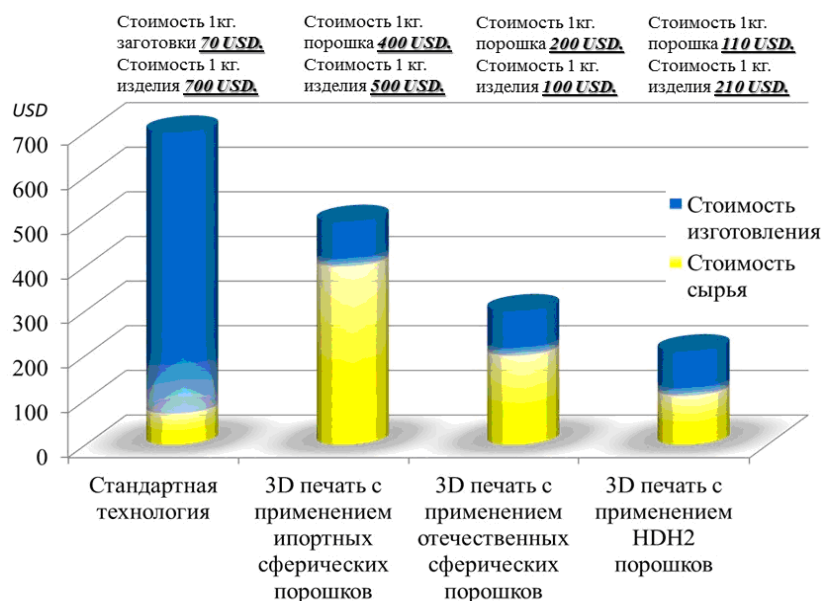


Рис. 2. Ориентировочная стоимость получения изделий из титановых материалов различными методами производства

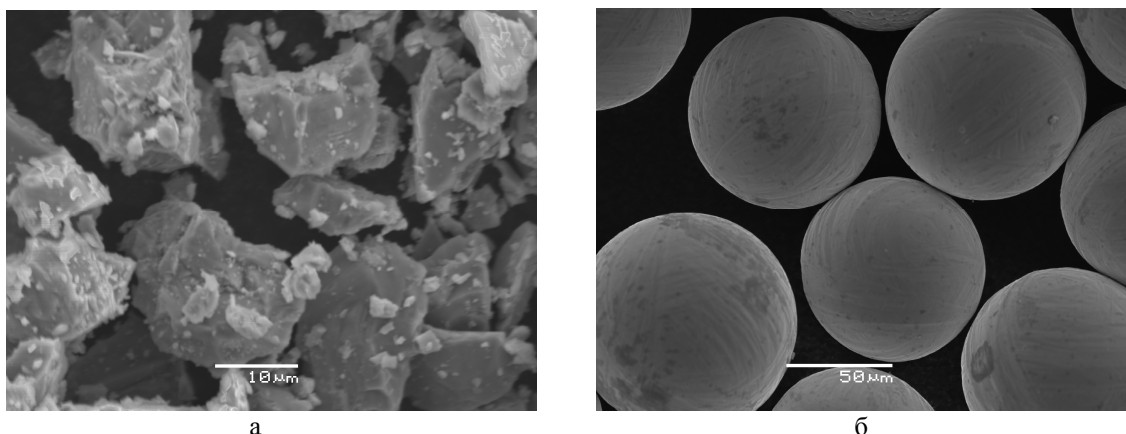


Рис. 3. Морфология полученных порошков: несферический порошок, полученный методом HDH (а), сферический порошок, полученный распылением расплава (б)

Таблица 1  
Содержание легирующих элементов и примесей в сплавах, полученных по разработанной технологии

Материал	Содержание примесей и легирующих элементов, % масс. долей									
	N	C	H	Al	V	Mo	Zr	Fe	Si	O
BT20 HDH2	≤0,05	≤0,1	0,012	5,5-7	0,8-2,5	0,5-2	1,5-2,5	≤0,3	≤0,15	≤0,15
BT20 PREP* [9]	≤0,05	≤0,1	≤0,15	6,0-6,8	1,0-2,3	0,6-1,8	1,6-2,4	≤0,25	≤0,15	≤0,15
BT20 ГОСТ	≤0,05	≤0,1	≤0,15	5,5-7,0	0,8-2,5	0,5-2,0	1,5-2,5	≤0,25	≤0,15	≤0,15

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

Таким образом, предлагаемая технологическая схема получения легированных порошков титана позволяет исключить дорогостоящие и сложные операции производства прутковых заготовок из титановых сплавов: смешивание титановой шихты с лигатурами, вакуумные переплавы, выплавка слитков, их атомизацию в специальных сложных устройствах – атомизаторах, а также обеспечить возможность производства порошков на базе существующего промышленного оборудования.

Полученные порошковые материалы использовали при получении образцов методами послойного наращивания с применением электронного луча. Анализ структуры материала полученных образцов

показал, что независимо от морфологии используемых порошковых материалов структура является мелкозернистой и полностью соответствует структуре литых образцов. Установлено, что полученные образцы по своим свойствам не уступают литым соответствующего химического состава.

### Заключение

В целом, можно сделать следующие выводы:

- технология получения легированного титана губчатого позволяет исключить затратные и технологически сложные операции смешивания титановой шихты с лигатурами, вакуумные переплавы, выплавки слитков, атомизации сплавов;

- разработана технология легирования титана губчатого в процессе магнетермического восстановления, которая позволяет получать титан губчатый с заданным содержанием и с равномерным распределением легирующих элементов;

- разработана 3D модель и изготовлен (методами аддитивных технологий) прототип диффузора компрессора высокого давления ГТД. Основным преимуществом полученного изделия является существенное до 30% снижение массы, чего удалось достигнуть за счет получения детали новой геометрии, которая обеспечивает более жесткую конструкцию;

- разработанная технологическая схема получения порошков легированного титана обеспечивает их химический и фракционный состав, соответствующий зарубежным аналогам для АМ-технологий, а также дает возможность создания серийного производства HDH порошок системы Ti-Mo-Al-V-Zr на базе существующего промышленного оборудования;

- проведенные исследования влияния морфологии порошковых материалов на структуру, при получении образцов методами электронно-лучевой

сварки показали, что независимо от формы частиц порошка полученная структура соответствует структуре литых образцов аналогичного химического состава.

## 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. Мутылина. - С.-Пб. : Издательство политехнического университета, 2013. - 221 с.

3. Терновой, Ю. Ф. Полуфабрикаты и изделия из распыленных металлических порошков [Текст] / Ю. Ф. Терновой, Н. Н. Пашетнева, С. А. Воденников. - Запорожье : Изд-во Запорож. гос. инженер. акад., 2010. - 180 с.

4. ASTM B213 - 13. Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.astm.org/Standards/B213.htm>. - 12.05.2016.

5. ASM Handbook, Volume 7 – Powder Metal Technologies and Applications [Электронный ресурс]. - ASM International, 1998. - Режим доступа: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpASMHVPMP/viewerType:toc/root\\_slug:asm-handbook-volume-07/url\\_slug:asm-handbook-volume-07/](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpASMHVPMP/viewerType:toc/root_slug:asm-handbook-volume-07/url_slug:asm-handbook-volume-07/). - 12.05.2016.

6. Froes, F. H. (Sam). Powder Metallurgy of Titanium Alloys [Text] / F. H. (Sam) Froes // in Advances in Powder Metallurgy ; Eds. Isaac Chang and Yuyuan Zhao, Woodhead Publishing, 2013. - 202 p.

7. Metalsys – Titanium [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.metalysis.com/titanium>. - 12.05.2016.

8. Хазнаферов, М. В. Технология получения «low-cost» порошков легированного титана для аддитивных процессов [Текст] / М. В. Хазнаферов, А. В. Овчинников, Т. Б. Янко // Титан. - 2015. - № 2. - С. 31-36.

9. William, Peter. Forging of Powder Metallurgy Processed Ti-6Al-4V [Электронный ресурс] / Peter William // Titanium 2012, October 7-10, Atlanta, Georgia, USA. - Режим доступа: [http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010\\_2014\\_papers/PeterWilliam\\_2012.pdf](http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/PeterWilliam_2012.pdf). - 12.05.2016.

10. Фроус, Ф. Х. Порошковая металлургия титановых сплавов [Текст] / Ф. Х. Фроус, Дж. Е. Смугерски. - М. : Металлургия, 1985. - 263 с.

11. Водородная технология титановых сплавов [Текст] / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов [и др.] ; под общей ред. А. А. Ильина. - М. : МИСИС, 2002. - 392 с.

12. Материалы сайта 3DSYSTEMS [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.3dsystems.com>. - 12.05.2016.

13. 3D Systems представляет новейшую уста-

новку для печати металлами [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d-systems-introduces-the-latest-installation-for-printing-on-metals/>. - 12.05.2016.

14. Froes (Sam), F. H. Titanium Powder Metallurgy : A Review, Part 1 [Электронный ресурс] / F. H. (Sam) Froes // ADVANCED MATERIALS & PROCESSES, September 2012. - Режим доступа : <http://www.asminternational.org/documents/10192/1877324/amp17009p16.pdf/2df24a9d-754d-4801-8aa1-3759cf4e6b64/AMP17009P16>. - 12.05.2016.

## References

1. Dovbysh, V. M., Zabednov, P. V., Zlenko M. A. Additivnye tehnologii i izdelija iz metalla. Bibliotekhka litejshhika [Additive technologies and metal wares. Teemer library], 2014, no. 9, pp. 14 - 71.

2. Zlenko, M. A., Popovich, A. A., Mutylina, I. N. Additivnye tehnologii v mashinostroenii [Additive technologies in machine engineering]. Sankt-Peterburg, Izdatel'stvo politehnicheskogo universiteta Publ., 2013. 221 p.

3. Ternovoj, Ju. F., Pashetneva N. N., Vodennikov, S. A. Polufabrikaty i izdelija iz raspylenykh metallicheskih poroshkov [Semifinished products made of sprayed metallic powders]. Zaporozh'e, Izd-vo Zaporozh. gos. inzhener. akad. Publ., 2010. 180 p.

4. ASTM B213 -13. Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel. Available at: <https://www.astm.org/Standards/B213.htm> (accessed 12.05.2016).

5. ASM Handbook, Volume 7 – Powder Metal Technologies and Applications. ASM International Publ., 1998. Available at: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpASMHVPMP/viewerType:toc/root\\_slug:asm-handbook-volume-07/url\\_slug:asm-handbook-volume-07/](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpASMHVPMP/viewerType:toc/root_slug:asm-handbook-volume-07/url_slug:asm-handbook-volume-07/) (accessed 12.05.2016).

6. Froes (Sam), F H. Powder Metallurgy of Titanium Alloys. In Advances in Powder Metallurgy, Eds. Isaac Chang and Yuyuan Zhao, Woodhead Publishing. 2013. 202 p.

7. Metalsys – Titanium. Available at: <http://www.metalysis.com/titanium> (accessed 12.05.2016).

8. Haznaferov, M. V., Ovchinnikov, A. V., Janko, T. B. Tehnologija poluchenija «low-cost» poroshkov legirovannogo titana dlja additivnyh processov [Technology of low-cost titanium powder production for additive processes]. Titan, 2015, no. 2, pp. 31-36.

9. Peter William. Forging of Powder Metallurgy Processed Ti-6Al-4V. Titanium 2012, October 7-10, Atlanta, Georgia, USA. Available at: [http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010\\_2014\\_papers/PeterWilliam\\_2012.pdf](http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/PeterWilliam_2012.pdf) (accessed 12.05.2016).

10. Frous, F. H., Smugerski, Dzh. E. Poroshkovaja metallurgija titanovykh splavov [Powder metallurgy of titanium alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 263 p.

11. Il'in, A. A., Kolachev, B. A., Nosov, V. K., Mamonov, A. M. Vodородnaja tehnologija titanovykh

*splavov* [Hydrogen technology of titanium alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2002. 392 p.

12. *Materialy sajta 3DSYSTEMS* [Materials Site 3D SYSTEMS]. Available at: <http://www.3dsystems.com> (accessed 12.05.2016).

13. *3D Systems predstavljajet novejšuju ustanovku dlja pečati metallami* [3D Systems has introduced a new printing plant for metals]. Available at: [http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d-systems-](http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d-systems-introduces-the-latest-installation-for-printing-on-metals/)

[introduces-the-latest-installation-for-printing-on-metals/](http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d-systems-introduces-the-latest-installation-for-printing-on-metals/) (accessed 12.05.2016).

14. Froes (Sam), F. H. Titanium Powder Metallurgy : a review, Part 1. *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES*, September 2012. Available at: <http://www.asminternational.org/documents/10192/1877324/amp17009p16.pdf/2df24a9d-754d-4801-8aa1-3759cf4e6b64/AMP17009P16> (accessed 12.05.2016).

*Поступила в редакцию 12.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., профессор кафедры А. Я. Качан, ЗНТУ, Запорожье.

## ЗАСТОСУВАННЯ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ (HDH2) В АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

*П. Д. Жеманюк, Ю. Ф. Басов, О. В. Овчинников, О. А. Джуган, А. В. Михайлютенко*

Аддитивні технології є перспективним напрямком у розвитку таких галузей промисловості як високоточне машинобудування і авіадвигунобудівництва. У той же час висока собівартість процесу 3D друку і відсутність альтернативного (імпортному порошку) сировини перешкоджає широкому поширенню зазначених технологій. У даній роботі показана принципова можливість використання більш дешевих порошкових матеріалів на основі титану з несферичною формою частинок, одержуваних за технологією гідрування-дегідрування і з частинками сферичної форми, отриманих за технологією плазмового розпилення, призначених для виготовлення об'ємних виробів різними методами адитивних технологій.

**Ключові слова:** адитивне виробництво, титанові сплави, легування, порошки, модель, конструкція, технологія, структура

## APPLICATION OF TITANIUM POWDER OF NEW GENERATION (HDH2) FOR THE ADDITIVE TECHNOLOGY

*P. D. Zhemanyuk, Y. F. Basov, A. V. Ovchinnikov, A. A. Dzhugan, A. V. Mykhailitenko*

Additive technology is a promising direction in the development of industries such as the high-precision engineering and Aircraft engine. At the same time, the high cost of 3D printing process and the lack of alternative (import powder) raw materials prevents the wide dissemination of these technologies. The possibility of using cheaper powder materials based on titanium with non-spherical particle shape, obtained by hydrogenation-dehydrogenation technology, and with particles of a spherical shape, obtained by plasma spray technology for the manufacture of bulk products by various methods of additive technologies was considered in this paper.

**Keywords:** additive manufacturing, titanium alloys, alloying powders, the model construction, technology, structure

**Жеманюк Павел Дмитриевич** – канд. техн. наук, Заместитель председателя совета директоров, Технический директор АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

**Басов Юрий Федорович** – канд. техн. наук, главный конструктор АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

**Овчинников Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой ОТСВ, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

**Джуган Александр Андреевич** – аспирант кафедры физического материаловедения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: o.a.dzhugan@gmail.com.

**Михайлютенко Анатолий Васильевич** – заместитель главного конструктора АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

**Zhemanyuk Pavel Dmitrievich** – Candidate of Technical Science, Deputy Chairman of the Board, Technical Director of "Motor Sich" Ltd, Zaporozhye, Ukraine.

**Basov Yuriy Fedorovich** – Candidate of Technical Science, Chief Designer, "Motor Sich" Ltd, Zaporozhye, Ukraine.

**Ovchinnikov Aleksandr Vladimirovich** – D.Sc, Professor, Head of department "Welding Technology and Equipment"; Zaporozhye national technical university, Zaporozhye, Ukraine.

**Dzhugan Alexander Andreevich** – Ph.D. student of department "Physical Material Science", Zaporozhye national technical university, Ukraine, e-mail: o.a.dzhugan@gmail.com.

**Mykhailitenko Anatoly Vasilievich** – Deputy Chief Designer, "Motor Sich" Ltd, Zaporozhye, Ukraine.