

УДК 621.762.07

**Д-р техн. наук А. В. Овчинников, д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий,  
А. А. Джуган**

*Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье*

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ГИДРИРОВАННЫХ И ДЕГИДРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ТИТАНА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

*Показана возможность применения несферических титановых порошков, которые прошли процессы гидрирования и дегидрирования в качестве альтернативного сырья, применяемым на сегодняшний день сферическим порошкам для аддитивных технологий (3-D печати). Изучено влияние толщины слоя насыпаемого порошка на структуру материала с целью получения более плотной беспористой и однородной структуры.*

**Ключевые слова:** порошок, форма, титан, слой, лазер, печать, структура, поры, свойства.

Процесс послойного выращивания изделий различными методами аддитивных (additive manufacturing - AM) технологий приобретает все большую популярность в различных отраслях производства, и авиадвигателестроении в частности, поскольку обладает рядом значительных преимуществ перед существующими, традиционными методами изготовления, обработки и ремонта деталей. К основным преимуществам методов 3-D печати можно отнести следующие: возможность изготовления деталей сложной формы и различной конфигурации, (при использовании только трехмерной модели будущего изделия), возможность применения различных материалов для печати на одной установке и возможность оперативного изменения геометрии деталей без необходимости изготовления новой оснастки, а также обеспечения высокого коэффициента использования материала. Все это дает возможность применения аддитивных технологий как при массовом, так и при мелкосерийном производстве. Следует также отметить, что особенности различных методов 3-D печати позволяют использовать их для восстановления и ремонта изделий, а также дают возможность изготавливать детали с закрытыми полостями. Несмотря на все вышеперечисленные достоинства аддитивных технологий, на данном этапе развития отечественного рынка машиностроения, они пока не получили широкого распространения, поскольку обладают одним главным недостатком — дорогой применяемого сырья, которым являются сферические порошки зарубежного производства.

В разных машинах используются порошки различного фракционного состава, которые классифицируют по условному диаметру частиц, подразделяя их на нанодисперсные с диаметром час-

тиц менее 0,1 мкм, ультрадисперсные с диаметром 0,1–1,0 мкм, высокодисперсные от 1,0 до 10 мкм, мелкие от 10 до 40 мкм, средние от 40 до 250 мкм и крупные от 250 до 1000 мкм. Одним из параметров, характеризующих порошок, является величина  $d_{50}$  — средний диаметр частиц. Например, если  $d_{50}$  равно 40 мкм, то это означает, что у 50 % частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм [1, 2]

Сегодня аддитивные технологии (3-D печати) успешно применяются для производства изделий из пластика. Но также одновременно ведутся активные работы по использованию в качестве сырья для таких технологий различных металлических и керамических порошков, однако, вызванные при этом сложности уменьшают номенклатуру металлических изделий, получаемых с помощью AM-технологий [3, 4]. Наличие оборудования для AM-технологий в Украине диктует свои условия для активного их внедрения в различные отрасли производства. При этом важной задачей является замена существующих дорогих импортных порошковых материалов отечественными аналогами.

Таким образом существует необходимость разработки порошков для AM-технологий. Поэтому, основной задачей, поставленной в работе, было определить возможность применения титановых порошков несферической формы, которые прошли процесс гидрирования и дегидрирования в аддитивных технологиях для получения готовых изделий.

Титановые порошки отечественного производства могут подойти в качестве альтернативного сырья для AM-технологий с небольшой доработкой.

Термомеханический порошок титана несферической формы, марок ПТ получают при дроблении блоков титана губчатого и последующего отсева дробленной части по фракциям (ПТ5, ПТ4, ПТ3 и др.). Мелкие частички губки, из которых состоит рассматриваемый порошок, характеризуется собственной пористостью и могут включать несколько зерен. Каждая такая частичка имеет высокоразвитую поверхность, а также насыщена сопутствующими вредными примесями, (такими как хлор и железо).

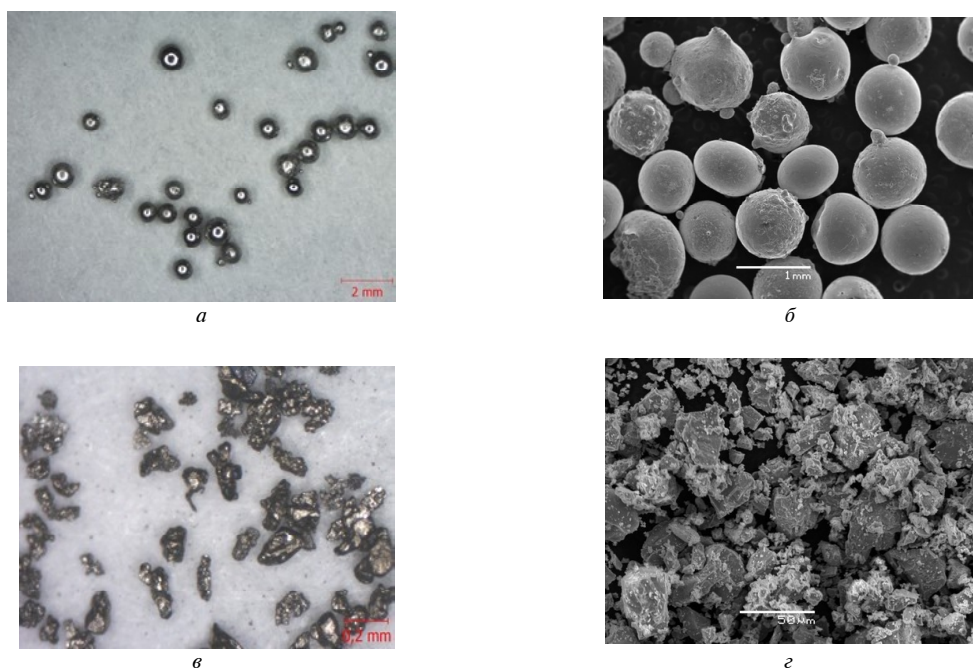
Порошок титана можно получать пользуясь гидридными технологиями [5]. Так, блоки титана губчатого подвергают гидрированию для повышения хрупкости титана. Хрупкий титановый блок дробят механическим путем и отсеивают по фракциям. Главным недостатком этой технологии является необходимость использования дорогого и сложного оборудования. К тому же гидрирование блока титана губчатого требует применения крупногабаритного оборудования. Несмотря на перечисленные недостатки такой технологии получения порошков, их использование позволяет получать заготовки высокого качества.

Анализ технологических показателей производства порошков, их преимуществ и недостатков показал, что наиболее перспективным материалом для АМ- технологий является порошок, получаемый по гидридной технологии. Такой материал имеет поверхности порошинок, контуры которых приближены к сферической форме.

Он менее, чем остальные, загрязнен примесями, поскольку водород способствует очищению титана при дегидрировании [6, 7]. Поэтому предложено использование порошков марок ПТ, которые подвергнуты операциям гидрирования и дегидрирования в технологической цепочке производства порошков для получения изделий различными методами аддитивных технологий.

Совокупность технологических решений производства таких порошков титана позволяет получать более плотный материал с меньшим содержанием вредных примесей, что повышает качество порошка и улучшает его морфологию [8, 9].

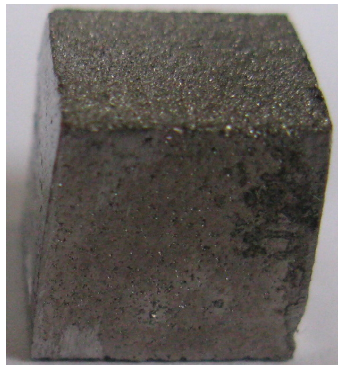
В этой работе представлены результаты моделирования процесса трехмерной печати по технологии SLS (Selective Laser Sintering – селективное лазерное спекание) с использованием менее дорогостоящего порошка титана, получаемого дроблением титановой губки (рис. 1 *в, з*), в сравнении со сферическими порошками (рис. 1 *а, б*), стоимость которых в несколько раз превышает стоимость вышеупомянутого порошка. Технология SLS выбрана потому, что порошинки, имеющие угловатую форму, обладают невысокой текучестью, что является важным фактором при использовании других методов печати [10]. Следует отметить, что частицы несферической формы обеспечивают меньшую пористость порошковых изделий, а также, в отличие от сферических порошков, могут быть скомпактированы в холодном состоянии [11].



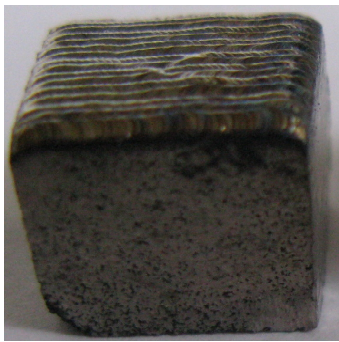
**Рис. 1.** Фото титановых порошков разной формы: *а* – сферический (оптический микроскоп), *б* – сферический (электронный микроскоп); *в* – несферический (оптический микроскоп), *з* – несферический (оптический микроскоп)

Для моделирования процесса послойного построения титанового образца был выбран гидрированный-дегидрированный порошок титана с фракцией 50–150 мкм производства ГП «Государственного научно-исследовательского и проектного института титана».

Процесс 3-D печати осуществляли путем насыпания небольшого слоя порошка (50–300 мкм.) на подложку (рис. 2), из такого же материала (предварительно спрессованного и спеченного) и последующего воздействия импульсным YAG-лазером с плотностью мощности излучения 900 МВт/м<sup>2</sup> при частоте следования импульсов 20 Гц для спекания порошинок как между собой так и с материалом подложки. Основной задачей являлось определение возможности и качества такого спекания титанового порошка, с целью получения плотной беспористой структуры.



*a*

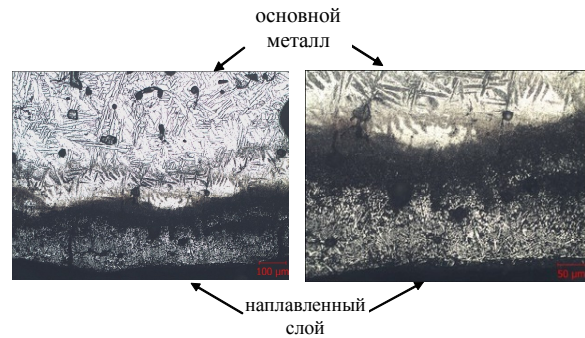


*b*

**Рис. 2.** Внешний вид образца: *a* – до и *b* – после моделирования процесса 3-D печати

В первом случае толщина слоя составляла около 200...300 мкм, а во втором примерно 50...100 мкм. Микроструктура полученных образцов приведена на рисунках 3, 4.

Как видно из приведенных выше рисунков, при построении 3-D модели с использованием слоя толщиной 50...100 мкм образуется менее пористая и более однородная структура по сравнению со слоем толщиной 250...300 мкм, что, в свою очередь, будет положительно сказываться на механических свойствах получаемых изделий.



**Рис. 3.** Микроструктура основного материала и наплавленного слоя толщиной 250–300 мкм



**Рис. 4.** Микроструктура основного материала и наплавленного слоя толщиной 50–100 мкм

Измерения микротвердости показали, что значения твердости наплавленного слоя и материала подложки находятся в одном диапазоне и составляют примерно 3000 МПа.

Таким образом, можно сделать вывод, что титановые порошки которые прошли технологический процесс гидрирования и дегидрирования, являются перспективным материалом для применения в АМ-технологиях в качестве альтернативного сырья.

При моделировании процесса послойного построения, установлено, что использование слоя толщиной 50–100 мкм обеспечивает формирование однородной, плотной беспористой структуры, что будет благоприятно сказываться на свойствах будущих изделий. При увеличении слоя до толщины 250–300 мкм. в нем присутствуют остаточные поры, которые могут являться концентраторами напряжений.

Дальнейшее применение порошков такого типа требует тщательного изучения влияния формы и фракционного состава порошковых материалов на структуру и свойства получаемых изделий, и также обработки технологических режимов процесса спекания. Это будет способствовать широкому распространению аддитивных технологий в различных отраслях отечественного производства.

**Список литературы**

1. Довбыш В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зленко // Библиотечка литейщика. – 2014. – № 9. – С. 14–71.
2. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / Зленко М. А., Попович А. А., Мутьлина И. Н. – Санкт-Петербург : Издательство политехнического университета, 2013. – 221 с.
3. Волхонский А. Е. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий / А. Е. Волхонский, К. В. Дудков // Образовательные технологии. – 2014. – № 1. – С. 127–143.
4. Дежина И. Г. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» [Электронный ресурс] : Дежина И.Г., Пономарев А.К., Фролов А.С. и др. – Сколковский институт науки и технологий. – 2015 –Режим доступа: <https://reestr.extech.ru/docs/analytic/reports/new%20technologies2015.pdf>
5. Cokmak G. The processing of Mg-Ti for hydrogen storage; mechanical milling and plasma synthesis / G.Cokmak, Z.Karoly, I. Mohai, T. Ozturk, J. Szepvolgui // International journal of hydrogen energy. – 2010. – № 35. – P. 118–125.
6. Івасишин О. М. Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану / О. М. Івасишин, О. Б. Бондарчук, М. М. Гуменяк, Д. Г. Саввакін // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, №4. – С. 900–907.
7. Ивасишин О. М. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомасштабного промышленного применения / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, К. А. Бондарева [и др.] // Наука та інновації. – 2005. – № 2. – С. 44–57.
8. Бережко П. Г. Гидрирование титана и циркония и термическое разложение их гидридов / П. Г. Бережко, А. И. Тарасов, А. А. Кузнецов [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 11. – С. 47–56.
9. Єршова О. Г. Дослідження процесів гідрування-дегідрування титанового дроту / О. Г. Єршова // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – № 3. – С. 785–790.
10. Порошковая металлургия титановых сплавов / под ред. Ф. Х. Фроус и Дж. Е. Смугерски ; пер. с англ. под ред. С. Г. Глазунова. – М. : Металлургия, 1985. – 263 с.
11. Водородная технология титановых сплавов / [А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов, А. М. Мамонов] ; под общей ред. А. А. Ильина. – М. : МИСИС. – 2002. – 392 с.

**Овчинников О.В., Ольшанецкий В.Ю., Джуган О.А. Застосування несферичних гідрованих і дегідрованих порошків титану для отримання виробів в аддитивних технологіях**

*Показана можливість застосування несферичних титанових порошків, що пройшли процеси гідрування і дегідрування як альтернативної сировини сферичним порошкам які застосовуються сьогодні в адитивних технологіях (3-D друку). Встановлено вплив товщини шару порошку, що насипається, на структуру матеріалу з метою отримання більш щільної безпористої та однорідної структури.*

**Ключові слова:** порошок, форма, титан, шар, лазер, друк, структура, пори, властивості.

**Ovchinnikov A., Olshanetskiy V., Dzhugan A. Application of non-spherical hydrogenation and dehydrogenation titanium powder for obtaining products in additive technologies**

*The possibility of using non-spherical titanium powders that have undergone hydrogenation and dehydrogenation proses as alternative raw materials used to date, spherical powders for additive technologies (3-D printing). The influence of the thickness of the layer of poured powder on the structure of the material in order to obtain a more dense and homogeneous structure.*

**Key words:** powder, form, titanium, layer, the laser, printing, structure, pores, properties.