

УДК 621.762.07

А. А. Джуган, д-р техн. наук В. Е. Ольшанецький, д-р техн. наук А. В. Овчинников,
канд. техн. наук Л. П. Степанова, О. А. Михайлютенко

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТИТАНОВЫХ ПОРОШКОВ В МЕТОДАХ 3D ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ

Исследованы форма, поверхность и микроструктура частиц титановых порошков, полученных разными методами. Рассмотрены закономерности формирования структуры при производстве изделий методами аддитивных технологий с использованием порошковых материалов с различной морфологией частиц. Показано преимущество применения, в качестве сырья, титановых несферических порошков взамен сферических.

Ключевые слова: технология, титановый порошок, поверхность, морфология, структура, слой, свойства, сплавление.

Потребность в титановых слитках и сортовом прокате с каждым годом постоянно увеличивается, поскольку уникальное сочетание свойств титановых материалов (удельная прочность, коррозионная стойкость, жаропрочность, износостойчивость) позволяет применять их для широкого спектра изделий, номенклатура которых неустанно расширяется.

На сегодняшний день титан и сплавы на его основе широко применяются в различных отраслях промышленности: высокоточное машиностроение, авиадвигателестроение, химическая и нефтехимическая промышленность, космическая техника, судостроение, атомная энергетика, медицина. Полуфабрикатами при изготовлении изделий для перечисленных отраслей в большинстве случаев являются заготовки в виде прутков, получаемых деформацией сплавов.

В то же время, производство деталей и изделий из титана и сплавов на его основе сопряжено с целой цепочкой технологически сложных металлургических переделов (например, вакуумно-дуговой и электронно-лучевой переплавы). Причем, слитки, полученные после переплава, массой от 2 до десятков тонн и диаметром от 300мм, подвергаются сложной деформационной обработке, что в значительной степени влияет на стоимость конечного изделия. Необходимо особо отметить, что при изготовлении изделий методами механической обработки до 70 % материала уходит в отходы. При этом коэффициент использования материала составляет всего 0,3–0,4.

В связи с вышесказанным, на сегодняшний день является актуальным получение изделий из титана методами порошковой металлургии, а в последнее время широко применяются методы аддитивных технологий, которые дают возможность получать готовые изделия с резким сокращением числа операций механической обработки и повышением коэффициента использования материала до 0,9–0,95, а в отдельных случаях и до 0,98. Важной особенностью процессов аддитивных тех-

нологий является многократное сокращение количества рабочих операций, например, цикл производства изделий методами 3D печати, начиная от порошкового сырья до готовой детали, сводится до 1–3 операций.

Несмотря на все преимущества аддитивных технологий, их большим недостатком является значительная стоимость используемого сырья в виде порошков сферической формы различного фракционного и химического составов (рис. 1).

К наиболее распространенным методам получения металлических порошков относят: восстановление окислов металлов, распыление определенного расплава, гидрометаллургические методы (в том числе автоклавный и карбонильный), электролиз водных и соляных растворов, диффузионное насыщение с точечных источников, измельчение твердых веществ [1, 2].

Самое широкое применение в мире получили методы восстановления и распыления, с помощью которых производят до 80 % общего количества порошков.

Одним из главных методов получения порошков на основе титана, в том числе порошков высокой чистоты, является распыление вращающегося электрода (рис. 2). В этом случае электрод из расплаваемого сплава вращается вокруг горизонтальной оси, а его свободный конец расплавляют с помощью электрической дуги. Капли расплавленного металла срываются с электрода, и кристаллизируются в свободном падении до столкновения со стенками камеры распыления. В этой камере присутствует защитная инертная среда (или вакуум), что позволяет получать порошки с высокой чистотой поверхности. Частицы, полученного таким способом порошка, имеют сферическую форму. Средний размер этих частиц зависит от технологических параметров распыления и отвечает интервалу размеров 40...200 мкм.

Например, сферические порошки, представленные на рис. 1, были получены методом плазменного центробежного распыления в ЦНТУ «Рapid» (рис. 2).

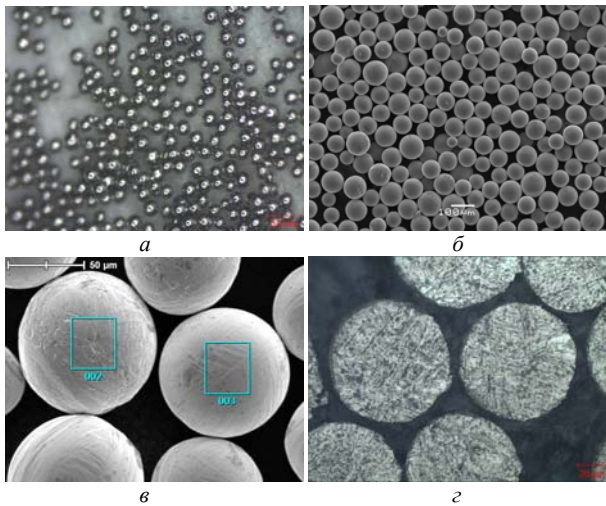


Рис. 1. Внешний вид (а, б, в) и структура (г) титановых порошковых материалов сферической формы

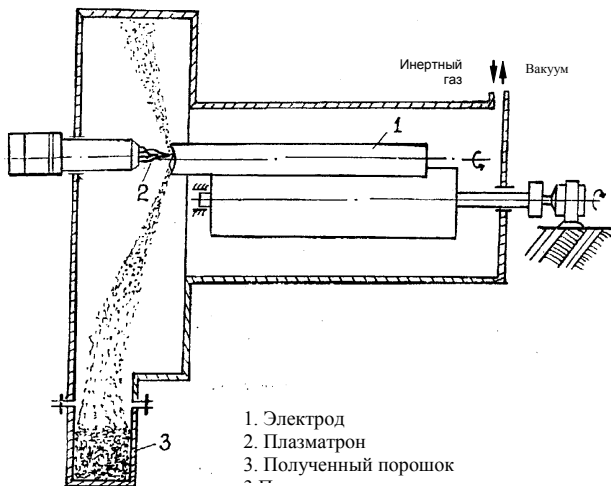


Рис. 2. Схема получения сферических порошковых материалов методом центробежного распыления

Исследование химического состава порошковых материалов (рис. 1в) показало, что они полностью соответствуют марке титана ВТ1-0 (согласно ГОСТу 19807-91).

Но получение сферических порошков является достаточно дорогостоящим процессом, поскольку их изготовление сопряжено с целым рядом технологических переделов для предварительного получения расходного электрода для распыления. Другие методы, например, метод «атомизации» получения порошковых материалов со сферической формой частиц, являются еще более дорогостоящими. Именно поэтому нами предложено использование титановых порошковых материалов с несферической формой частиц (альтернативных для аддитивных технологий) и полученных путем дробления титана губчатого до нужных фракций (рис. 3).

Исследования химического состава полученных порошковых материалов показали, что он полностью соответствует титану марки ВТ1-0 (согласно ГОСТу 19807-91).

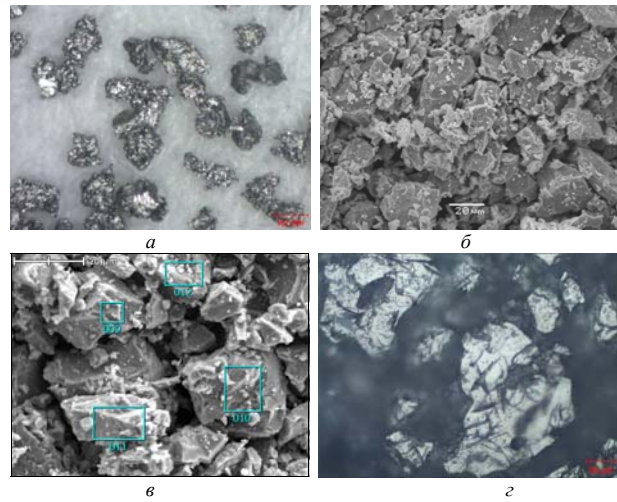


Рис. 3. Внешний вид (а, б, в) и структура (г) титанового порошкового материала несферической формы

Поскольку процесс дробления титановой губки с целью получения порошкового материала заданного фракционного состава тесно связан с операциями гидрирования и дегидрирования [3], дополнительно проводили рентгеновские исследования порошков после насыщения губки водородом и последующего дробления (рис. 4, табл. 1), а также после дегидрирования полученного порошка (рис. 5). На рисунках 4, 5 и в таблице 1 приведены результаты рентгеноструктурного анализа этих материалов.

Отметим, что на дифрактограмме после гидрирования и размалывания, порошкового материала наряду с основной фазой α -Ti, выявлены еще линии фазы TiH_2 (рис. 4), образовавшейся при насыщении титановой губки водородом. Высокая хрупкость этой фазы дала возможность легко раздробить губку до мелких частиц нужной фракции. Высокую хрупкость гидрида титана связывают с наличием ковалентной связи между атомами титана и водорода. Поэтому металлические гидриды образуются со значительным увеличением удельного объема, что создает большие внутренние напряжения у границы раздела матрица – гидрид и является причиной высокой хрупкости последней.

После процесса дегидрирования линии фазы TiH_2 на рентгеновской дифрактограмме уже отсутствовали (рис. 5). При этом содержание водорода в конечном продукте не превышало 0,2 %.

С целью определения возможности использования подобного рода порошковых материалов для получения изделий методами аддитивных технологий были изготовлены пробные опытные образцы, результаты исследования которых были опубликованы ранее [4].

Также, порошковые материалы с несферической формой частиц, полученные методом дробления губки, были испытаны на экспериментальной установке в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Внешний вид полученных образцов представлен на рисунке 6.

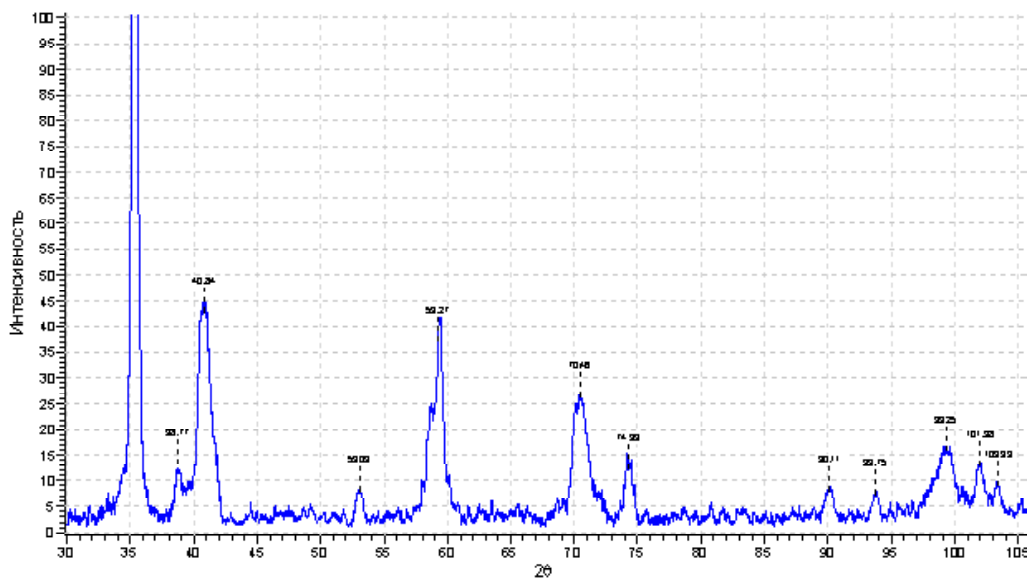


Рис. 4. Дифрактограмма титанового порошка несферической формы после гидрирования и размола

Таблица 1 – Результаты рентгеноструктурных исследований порошка после гидрирования и размола

№	Угол	ДНKL (экспериментальные значения)	Интенсивность, %	α-Ti (табличные значения)		TiH ₂ (табличные значения)	
				d_{hkl}	I	d_{hkl}	I
1.	35,37	2,538	100	2,55	С	2,55	ОС
2.	38,78	2,322	8	2,34	С		
3.	40,84	2,210	24			2,21	С
4.	53,03	1,726	5	1,728	Ср		
5.	59,28	1,559	21			1,56	С
6.	70,46	1,336	15	1,336	Ср	1,33	С
7.	74,33	1,276	7	1,257	Сл	1,27	Ср
8.	90,11	1,089	5			1,10	Сл
9.	93,75	1,056	4	1,065	Сл		
10.	99,25	1,012	9			1,01	Ср
11.	101,98	0,9922	7			0,99	Ср
12.	103,33	0,983	5	0,989	Сл		

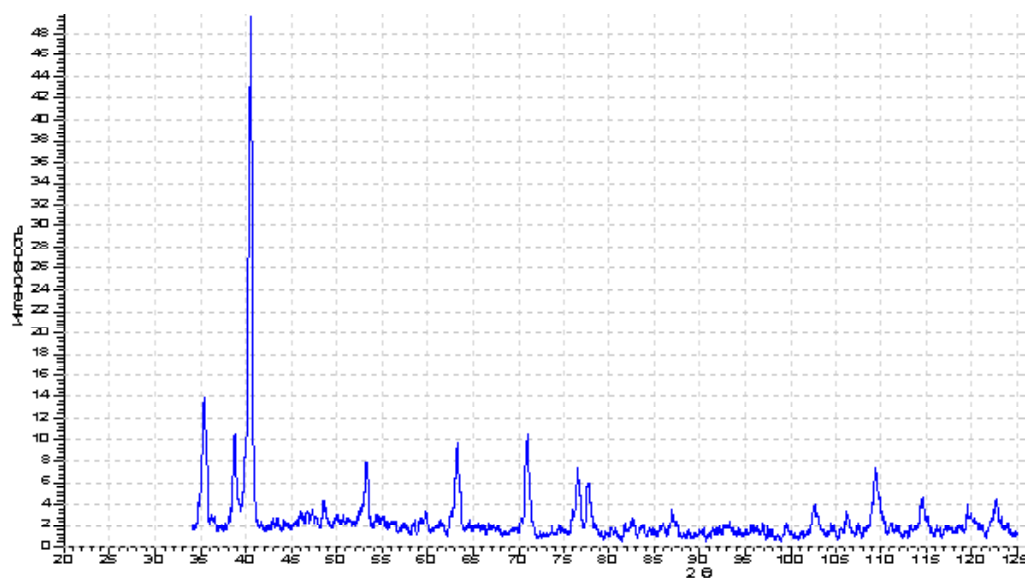


Рис. 5. Дифрактограмма порошка несферической формы после процесса дегидрирования

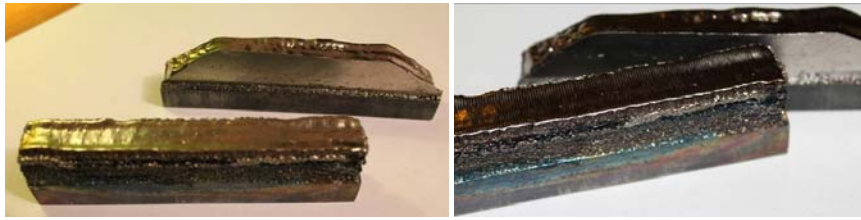


Рис. 6. Внешний вид образцов, полученных на экспериментальной установке

Поскольку одним из главных преимуществ аддитивных технологий является возможность изготовления изделий сложной геометрии (в том числе деталей с внутренними полостями), следующим этапом на пути эффективного использования новых порошковых материалов для аддитивных технологий был выбор принципиально новой сложной и ответственной детали авиакомпрессора, имеющей сложную конфигурацию. Эта конструкция, по расчетам, должна значительно улучшить эксплуатационные свойства всего агрегата (поскольку получение изделия более простой формы не представляло в данном случае особого интереса).

В качестве такой детали был выбран диффузор компрессора высокого давления (газотурбинного двигателя), 3D модель которого разработана специалистами АО «Мотор Сич» (рис. 7). Изначально были изготовлены, с применением термопластичного сырья, два варианта этого изделия с традиционной и новой конструкцией (рис. 7).

Расчет экономической эффективности изготовления диффузора компрессора методами аддитивных технологий показал, что использование методов 3D печати позволяет снизить вес изделия на 43 % (рис. 8).



a



б

Рис. 7. Вид моделей диффузора компрессора высокого давления ГТД из термопластичных материалов с различной конструкцией: *a* – сечение детали, полученной по традиционной технологии; *б* – сечение детали, полученной по новой аддитивной технологии



Рис. 8. Снижение веса изделия при использовании методов 3D печати

Следующим шагом было получение данного изделия, но уже в металле, что и было реализовано специалистами немецкой фирмы SLM Solutions с использованием титановых порошковых материалов сферической формы импортного производства (рис. 9).



Рис. 9. Внешний вид диффузора компрессора, изготовленного по модели АО «Мотор Сич» на SLM Solutions

В дальнейшем планируется применение несферических порошков отечественного производства для получения подобного рода изделий методами 3D печати. Данные порошки уже прошли предварительную апробацию при изготовлении опытных образцов с применением электронного луча [5, 6].

Анализ структуры материала полученных образцов показал, что, независимо от морфологии используемых порошков, структура металлических образцов является мелкозернистой и полностью соответствует структуре качественных литых образцов [7]. При этом, полученные образцы по своим свойствам не уступают литым (соответствующего химического состава).

В целом, по проведенным исследованиям можно сделать следующие выводы:

- разработана 3D модель и изготовлен (методами аддитивных технологий) прототип диффузора компрессора высокого давления ГТД. Основным преимуществом полученного изделия является существенное (до 43 %) снижение массы, чего удалось достигнуть за счет получения детали новой геометрии, которая обеспечивает еще и более надежную конструкцию.

- разработанная технологическая схема получения несферических порошков титана обеспечивает их химический и фракционный состав, соответствующий зарубежным аналогам для АМ-технологий, а также дает возможность создания серийного производства порошков 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 конечная структура материала соответствует качественной структуре литых образцов аналогичного химического состава.

Список литературы

1. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. – Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2013. – 221 с.
2. Джуган О. А. Аддитивні технології і можливості їх застосування в сучасних умовах / О. А. Джуган, О. В. Овчинников, В. Ю. Ольшанецький // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – № 2. – С. 96–101.
3. 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.
4. Джуган А. А. О предварительной оценке результатов использования имитационных аддитивных технологий получения и ремонта деталей авиационной техники / А. А. Джуган, А. В. Овчинников, В. Е. Ольшанецкий // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 136–139.
5. Ovchinnikov A. Technology of new generation titanium alloys powder for additive technology / A. Ovchinnikov, Y. Smolyak, A. Dzhugan and etc. // The ninth international conference on materials technologies and modeling MMT-2016. – 2016. – P. 102–109.
6. Применение титановых порошков нового поколения (НДН2) в аддитивных технологиях / [П. Д. Жеманюк, Ю. Ф. Басов, А. В. Овчинников и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 8. – С. 139–144.
7. Ольшанецкий В. Е. Возможность использования несферических титановых порошков для аддитивных технологий / В. Е. Ольшанецкий, А. В. Овчинников, А. А. Джуган // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 82–87.

Одержано 16.12.2016

Джуган О.А., Ольшанецький В.Ю., Овчинников О.В., Степанова Л.П., Михайлютенко О.А. Використання титанових порошків у методах 3D друку виробів

Досліджено форму, поверхню та мікроструктуру частинок титанових порошків, отриманих різними методами. Розглянуто закономірності формування структури при виготовленні виробів методами адитивних технологій з використанням порошкових матеріалів із різною морфологією частинок. Показано переваги застосування як сировини титанових несферичних порошків замість сферичних.

Ключові слова: технологія, титановий порошок, поверхня, морфологія, структура, шар, властивості, сплавлення.

Dzhugan A., Ol'shanetskii V., Ovchinnikov A., Stepanova L., Mykhailiutenko O. Titanium powder using in 3D printing of products

The shape, surface and microstructure of the particles of titanium powders produced by different methods were investigated. The characteristics of structure formation in the manufacture of products by means of additive technologies using powder materials with varying particle morphology were considered. The application advantage as raw material, non-spherical titanium powders instead of spherical were described.

Key words: technology, titanium powder, surface, morphology, structure, layer, properties, fused.