

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ И ПОСЛОЙНЫМ СЕЛЕКТИВНЫМ СПЕКАНИЕМ ПОРОШКА

Е.А. Петрикова¹⁾, А.Д. Тересов²⁾, Ю.Ф. Иванов³⁾

¹⁻³⁾Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, 634055 Томск, Россия,

¹⁾elizmarkova@yahoo.com, ²⁾tad514@yandex.ru, ³⁾yufi55@mail.ru

Работа направлена на выявление и анализ закономерностей формирования структуры и свойств образцов сплава на основе титана ВТ6, полученных методами традиционной металлургии и сформированных методом послойного селективного электронно-пучкового спекания в вакууме титанового порошка марки ВТ6 с размером частиц 40-100 мкм. Дополнительное модифицирование образцов осуществляли, облучая поверхность интенсивным импульсным электронным пучком. Показано, что воздействие импульсного электронного пучка на поверхность образцов, сформированных методом послойного селективного электронно-пучкового спекания, приводит к значительному уменьшению шероховатости и пористости поверхностного слоя материала, формированию в поверхностном слое поликристаллической структуры (размер зерен 15-60 мкм) с субструктурой в виде ячеек кристаллизации (размер ячеек 0.5-1.2 мкм). Электронно-пучковая обработка литых образцов при указанных параметрах пучка электронов приводит к формированию в поверхностном слое поликристаллической структуры (размер зерен 50-800 мкм) с пластинчатой внутризеренной субструктурой. Механические испытания, выполненные путем растяжения плоских образцов, показали, что наиболее высоким сочетанием прочности и пластичности обладают образцы, полученные методом послойного селективного электронно-пучкового спекания с последующим облучением интенсивным импульсным электронным пучком.

Введение

Развивающиеся в настоящее время аддитивные технологии (АМ-технологии) работают по принципу послойного выращивания изделия на основе его компьютерной 3D-модели посредством нанесения слоев разной толщины [1-3].

Формирование изделия происходит в тонком (50-100 мкм) слое металлического порошка, где отдельные частицы спекаются под действием подводимого тепла. Общей проблемой в той или иной мере, характерной для всех видов АМ-технологий, является проблема обеспечения надлежащей микроструктуры синтезированного материала, устранения пористости.

В работах [4, 5] для минимизации пористости предложен способ, согласно которому производят повторное сплавление слоя, т. е. каждый слой «обрабатывается» лазером дважды. В результате пористость снижается на порядок, однако при этом почти вдвое увеличивается время построения детали. Следующим недостатком АМ-технологий является анизотропия структуры и свойств материала, высокие внутренние напряжения, что неизбежно при послойном принципе создания изделия. Весьма часто на границе изделие-порошок образуется пористый слой с большой шероховатостью, обусловленный недостаточным уровнем сплавления отдельных частиц порошка.

В [6, 7] проанализировав возможности современных аддитивных технологий, выделены следующие основные их преимущества: (1) создание объекта с помощью одной процедуры; (2) возможность изготовления объекта, который не может быть изготовлен иным способом; (3) построение объекта любой сложности с минимальными временными затратами на приготовление процесса (нет необходимости в разработке технологического процесса); (4) построение объекта, элементы которого состоят из разных материалов; и недостатки: (1) дорогостоящие расходные материалы; (2) невысокая точность при быстрой

печати; (3) относительно низкая прочность изделий; (4) необходимость в некоторых случаях последующей обработки поверхности.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ структуры и механических свойств образцов сплава на основе титана ВТ6, полученных методами традиционной металлургии и послойного селективного электронно-пучкового спекания в вакууме титанового порошка марки ВТ6 с размером частиц 40-100 мкм.

Материал и методики исследования

Материалом исследования являлись образцы титанового сплава марки ВТ6, различающиеся способом подготовки к исследованию. Первая партия образцов (литые образцы) была вырезана из прутка диаметром 15 мм (предварительная термомеханическая обработка образцов соответствовала ГОСТ 22178-76) параллельно продольной оси заготовки. Вторая партия образцов была изготовлена методом послойного селективного электронно-пучкового спекания в вакууме (установка «Arcam A2X» фирмы Arcam (Швеция) [8]) титанового порошка марки ВТ6 с размером частиц 40-100 мкм (АМ-технология). Половина образцов первой и второй партии была подвергнута облучению интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [9]. Облучение образцов осуществляли при следующих параметрах работы установки: энергия ускоренных электронов 15 кэВ, плотность энергии в импульсе 45 Дж/см², длительность импульсов 200 мкс, количество импульсов на участок поверхности 10, частота следования импульсов 0.3 с⁻¹, рабочее давление в камере 3.5·10⁻² Па (Ar). Механические испытания материала на растяжение (установка «Instron, модель 3369») осуществляли на образцах с узкой частью с параллельными сторонами и прямоугольными концами. Структуру образцов изучали методами растровой электронной микроскопии (прибор SEM-515 «Philips»).

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведены результаты испытаний на растяжение образцов сплава ВТ6, полученных различными методами.

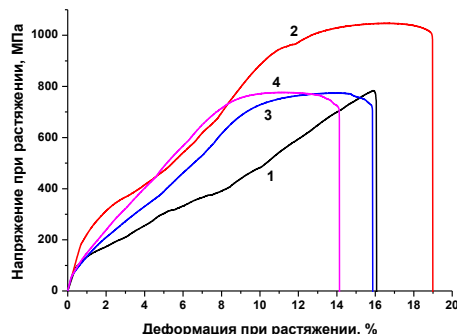


Рис. 1. Кривые деформационного упрочнения образцов титанового сплава ВТ6, изготовленных методом послойного селективного электронно-пучкового спекания в вакууме (№1 и №2), и литых образцов (№3 и №4), полученных при испытаниях на растяжение; 1 – АМ-технология; 2 – АМ-технология с последующим облучением электронным пучком на установке «СОЛО»; 3 – литой материал; 4 – литой материал после дополнительной обработки интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО»

Анализируя результаты, представленные на рис. 1, можно обнаружить, что наиболее высоким сочетанием механических свойств обладают образцы, полученные методами АМ-технологии и дополнительно облученные интенсивным импульсным электронным пучком. Очевидно, что выявленные различия в механических свойствах обусловлены различием в состоянии дефектной структуры исследуемых материалов. Исследование зеренной структуры образцов сплава ВТ6, сформированных методами АМ-технологии и традиционной металлургии, показали, что облучение интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» приводит к формированию поликристаллической структуры, размеры зерен которой в первом случае (рис. 2а) изменяются в пределах 15-60 мкм; во втором (рис. 2б) – в пределах 50-800 мкм. В объеме зерен образца, сформированного методами АМ-технологии и дополнительно облученного электронным пучком на установке «СОЛО» формируется структура ячеистой кристаллизации с размером ячеек 0.5-1.2 мкм. В объеме зерен литых образцов сплава ВТ6, дополнительно облученных интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО», наблюдается грубая пластинчатая структура. Выполнены исследования поверхности разрушения сплава на основе титана ВТ6 в литом состоянии и полученного методами АМ-технологии. Анализ структуры не выявил существенных отличий в структуре поверхности излома литого материала и материала, полученного методами АМ-технологии и дополнительно облученного интенсивным электронным пучком на установке «СОЛО». технологии, после дополнительного облучения

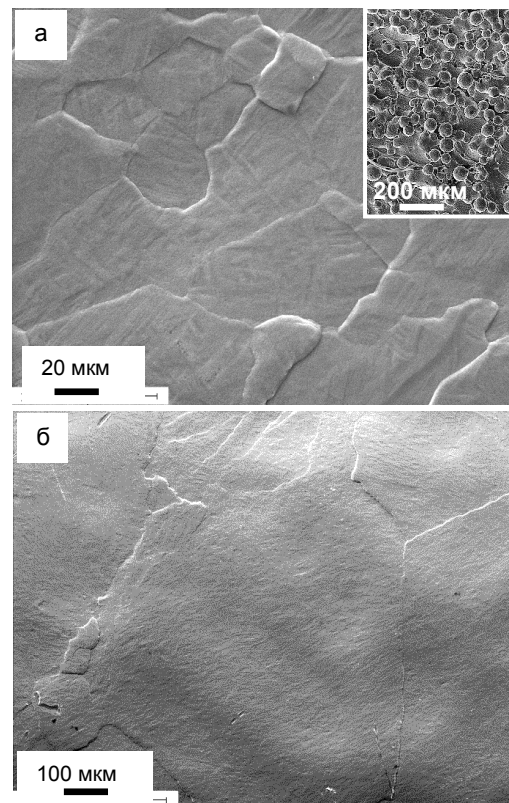


Рис. 2. Структура поверхности титанового сплава ВТ6, формирующаяся в результате облучения интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» образцов, приготовленных методом послойного селективного электронно-пучкового спекания порошка (а) и методами традиционной металлургии (б). Вставка на (а) демонстрирует структуру поверхности образца, сформированного методом АМ-технологии, перед облучением электронным пучком на установке «СОЛО»

Структура поверхности разрушения образца, полученного методами АМ-технологии и не облученного дополнительно интенсивным электронным пучком, имеет существенные отличия. В центральной зоне разрушенного образца выявляется протяженная область, характеризующаяся низким уровнем проплавления частиц порошкового материала. В образце, полученном методами АМ-технологии и дополнительно облученном электронным пучком на установке «СОЛО», подобных дефектов нет. Можно предположить, что облучение интенсивным электронным пучком поверхности образцов, полученных методами АМ-технологии, приводит не только к выглаживанию поверхности материала, но и модифицированию его объема.

Заключение

Показано, что воздействие импульсного электронного пучка на поверхность образцов, сформированных методом послойного селективного электронно-пучкового спекания, приводит к значительному уменьшению шероховатости и пористости поверхностного слоя материала, формированию в поверхностном слое поликристаллической структуры (размер зерен 15-60 мкм) с субструктурой в виде ячеек кристаллизации (размер

ячеек 0.5-1.2 мкм). Электронно-пучковая обработка литых образцов при указанных параметрах пучка электронов приводит к формированию в поверхностном слое поликристаллической структуры (размер зерен 50-800 мкм) с пластинчатой внутризеренной субструктурой. Механические испытания, выполненные путем растяжения плоских образцов, показали, что наиболее высоким сочетанием прочности и пластичности обладают образцы, полученные методом послойного селективного электронно-пучкового спекания с последующим облучением интенсивным импульсным электронным пучком. Основной причиной низкого уровня механических свойств образцов титанового сплава VT6, сформированных методами АМ-технологии, является высокий уровень пористости материала.

Список литературы

1. Evans B. Practical 3D printers: The science and art of 3D printing. New York: Apress, 2012. 306 p.
2. Campanelli S.L. et. al. // Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182 Italy [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>.
3. Louvis E. et. al. // Journal of Materials Processing Technology. 2011. V. 211. № 2. P. 275-284.
4. Yasa E. et. al. // Rapid Prototyping Journal. 2011. V. 17. № 5. P. 312-327.
5. Yasa E., Kruth J. // Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering & Management. 2011. V. 6. № 4. P. 259-270, ISSN 1854-6250 Scientific paper [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4_259-270.pdf
6. Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 2-2. С. 90-94.
7. Баева Л.С., Маринин А.А. // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1. С. 7-12.
8. Additive Manufacturing. 2016. Режим доступа: <http://www.arcam.com/technology/additive-manufacturing> (дата обращения 31.05.2016).
9. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Известия ВУЗов. Физика. 2008. № 5. С. 60-70.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF VT6 ALLOY OBTAINED BY TRADITIONAL METHODS AND FORMED BY LAYER-BY-LAYER SELECTIVE ELECTRON-BEAM SINTERING POWDER

Elizaveta Petrikova¹⁾, Anton Teresov²⁾, Yurii Ivanov³⁾

*Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
2/3 Akademicheskyy ave., 634055 Tomsk, Russia,*

¹⁾elizmarkova@yahoo.com, ²⁾tad514@yandex.ru, ³⁾yufi55@mail.ru

Work is directed to identification and the analysis of regularities of formation of structure and properties of alloy samples based on titanium VT6, obtained by traditional metallurgy methods and formed by layer-by-layer selective electron-beam sintering in vacuum of titanium powder grade VT6 with a particle size of 40-100 μm. Additional modification of the samples was carried out by irradiating the surface with an intense pulsed electron beam. It is shown that the impact of a pulsed electron beam on the surface of the samples formed by layer-by-layer selective electron-beam sintering leads to a significant decrease in the roughness and porosity of the material surface layer, the formation of a polycrystalline structure (grain size 15-60 μm) in the surface layer with a substructure in the form of the crystallization cells (the size of the cells 0.5-1.2 μm). Mechanical tests realized by stretching flat samples showed that the highest combination of strength and plasticity have samples obtained by layer-by-layer selective electron-beam sintering followed by irradiation with an intensive pulsed electron beam.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА Si-SiO₂ С ПОМОЩЬЮ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В.А. Пилипенко, В.А. Солодуха, В.А. Горушко, В.А. Филипеня
ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца И.П. 121А, 220108 Минск, Беларусь, office@bms.by

Показано, что проведение быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин и пленок двуокиси кремния, выращенных на их поверхности, позволяет стабилизировать зарядовые свойства границы раздела такой системы из-за уменьшения толщины нарушенного слоя в исходных кремниевых пластинах и совершенствования структуры выращенных пленок.

Введение

Межфазная граница раздела полупроводник-диэлектрик является составной частью большинства современных полупроводниковых приборов, от которой зависит их надежность работы и устойчивость характеристик по отношению к различного рода внешним воздействиям. Именно переходной слой подзатворного диэлектрика определяет такие его характеристики, как энер-

гия образования поверхностных состояний, плотность и положение кулоновских центров относительно границы раздела Si-SiO₂, параметры микрорельефа поверхности кремния, стойкость к воздействию горячих носителей.

Для стабилизации зарядовых свойств подзатворного окисла и его границы раздела применяются различные технологические приемы. Наибольшее распространение для нейтрализа-