

структурообразования при диффузионном легировании неравновесных чугуновых частиц.

### Литература

1. Пантелеенко, Ф.И. СДЛП на железной основе и защитные покрытия из них. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300с.

2. Любецкий, С.Н. Разработка технологии диффузионного легирования железных порошков и получение наплавленных износостойких покрытий: автореф. дисс. – канд. техн. наук: 05.16.01 / С.Н. Любецкий; БПИ. – Минск, 1991. – 20 с.

3. Криштал, М.А. Механизм диффузии в железных сплавах / М.А. Криштал – М.: «Металлургия», 1972. – 400с.

УДК 621.762

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПОРОШКАХ ТИТАНА ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ СПЕКАНИИ

Р.П. Быков<sup>1</sup>, К.Е. Белявин<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., Д.С. Пальчевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

(г. Минск, Республика Беларусь)

**Введение.** Получение из металлических, керамических и полимерных порошков материалов, имеющих открытую пористость и сложную пространственную геометрию поверхности, является актуальной задачей для порошковой металлургии. Данная задача может быть решена с помощью селективного лазерного спекания (СЛС) порошков, основанного на принципе послойного построения физической модели или послойного лазерного синтеза [1–3], в результате которого трехмерный объект заменяется совокупностью плоских слоев, физически связанных между собой.

Применяемые в настоящее время технологии СЛС порошков, ориентированные в основном на реализацию процессов, связанных с полным расплавлением частиц порошка, не могут обеспечить получение пористых материалов [3].

Возможность применения СЛС для получения пористых материалов базируется на идее использования энергии лазерного излучения для поверхностного оплавления частиц порошка при сохранении твердого ядра, что приводит к образованию межчастичных контактов в присутствии жидкой фазы.

Такая технология, обеспечивая минимальную усадку слоев при отсутствии конгломерации частиц, позволит получить заданную пористость изделий. Для разработки такой технологии необходимо выявить основные закономерности влияния лазерного излучения на порошки и изучить механизм контактообразования.

**Методика исследований.** Для проведения исследований использовали разработанную и изготовленную в Институте порошковой металлургии совместно с Институтом физики НАН Беларуси многоцелевую установку порошковой лазерной стереолитографии УПЛС-1, обладающую комплексом уникальных технологических возможностей и большим исследовательским потенциалом.

В качестве материала для проведения исследований использовали сферический порошок титана марки ВТ1-0 ГОСТ 19807-91 фракции (-0,4+0,2) мм.

Микроструктуру порошков и полученных образцов изучали на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия). Форму частиц порошка и фрактограммы поверхностей образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа «Мира» фирмы «Tescan» (Чехия).

**Результаты исследования.** С целью исследования структурных изменений в порошках титана при СЛС был проведен металлографический анализ образцов  $\varnothing 5 \times 3$  мм и  $\varnothing 15 \times 3$ .

Проведенные металлографические исследования полученных образцов подтверждают, что в результате СЛС между частицами порошка образуются своеобразные «гантели», характерные для процессов сварки поверхностно-оплавленных частиц [4].

Установлено, что у частиц порошка при лазерном воздействии происходит локальное оплавление поверхности частиц с сохранением твердой фазы в центре частицы, о чем свидетельствует образование  $\alpha'$ -фазы в результате мартенситного превращения при перекристаллизации поверхностно-оплавленного слоя частиц.

Согласно образованию структур в титановых сплавах в зависимости от скорости охлаждения [5] и полученным металлографическим исследованиям можно судить о скорости охлаждения при перекристаллизации, которая сохраняется очень высокой, что может приводить к образованию термических деформаций, вызывающих изменение геометрической формы свариваемых слоев при СЛС.

**Выводы.** Анализ результатов исследования показал следующее.

1. При СЛС частиц порошка титана механизм контактообразования идет по пути жидкофазного спекания с сохранением твердой фазы в центре частиц.

2. При СЛС происходит образование  $\alpha'$ -фазы в результате мартенситного превращения при перекристаллизации поверхностно-оплавленного слоя частиц, что характерно для высоких скоростей охлаждения.

3. СЛС позволяет получать пористые материалы.

### Литература

1. The technology of rapid prototyping / Innovation Summer. J. Meteinick; 1992. P. 30-32.

2. Послойный синтез объемных изделий из никелида титана / Перспективные материалы, №6, 2004, И.В. Шишковский; с. 13-17.

3. Direct metal laser sintering / Advance materials & processes, 2002, J. Han-ninen; May. P. 33–35.

4. Порошковая металлургия, №1/2, 1997, / Толочко Н.К., Михайлов В.Б., Мозжаров С.Е., Соболенко Н.В., Ядройцев И.А. с. 54–62.

5. Металловедение / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1986 г.

УДК 621.762.224

## **ВВЕДЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ГРАФИТА В СОСТАВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

А.П. Ласковнев, член-корр., д-р техн. наук, Г.В. Марков, канд. техн. наук  
Физико–технический институт НАН Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)

На Минском моторном заводе для изготовления подшипников скольжения используется композиционный материал на основе сплава Al–Cu–Mg–Si с добавлением графита [1]. Чтобы получить этот композиционный материал в матричный расплав вводится лигатура, приготовленная из порошка алюминия и графита. Процесс приготовления лигатуры включает в себя смешивание порошков, их брикетирование, экструдирование и выдавливание порционных заготовок [2]. Так как содержание графита в композиционном материале не превышает 1–3 мас.%, то достаточно трудно добиться равномерного распределения включений графита по объему материала. Для этого используются различные методы, порой самые неординарные. В данной работе представлены результаты использования для данных целей вакуумного электродугового метода нанесения графитовых покрытий на стружечные алюминиевые материалы.

В вакуумном электродуговом методе (метод КИБ) [3], входящем в группу ионно–плазменных методов нанесения покрытий, основным инструментом нанесения покрытий является плазма вакуумной дуги, возбуждаемая (зажигаемая) в вакууме между проводящими катодом и анодом. При этом покрытие на подложке формируется в основном потоком положительных ионов, источником которого является катодное пятно вакуумной дуги.

Классическая картина [4–9] основных физических процессов, происходящих в катодном пятне вакуумной дуги металлов, когда между катодом и анодом создана некоторая разность электрического потенциала  $U$  и существует вакуумная дуга, включает в себя испарение атомов металла, термоавтоэлектронную эмиссию электронов, разлет испарившихся атомов, ускорение эмитируемых электронов и ионизацию ими испарившихся атомов металла, разлет образовавшегося плазменного облака.

Несколько иная картина физических процессов происходит в катодном пятне графита. Так как графит не плавится, то идет не испарение атомов углерода, а их сублимация с поверхности катода в катодном пятне. Из–за сильной анизотропии свойств графита катодное пятно на его поверхности является источником не микрокапель, а микрочастиц графита. Обычно размер этих микрочастиц расположен в интервале 0,01–10 мкм. При этом масса испускаемых пят-