

УДК 669.046

Н.Е. КАЛИНИНА<sup>1</sup>, О.А. КАВАЦ<sup>1</sup>, В.Т. КАЛИНИН<sup>2</sup>, В.П. БЕЛОЯРЦЕВА<sup>1</sup><sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет, Украина<sup>2</sup>Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЖАРОСТОЙКИХ СПЛАВОВ

Усовершенствован способ управляемого плазмохимического синтеза для получения нанодисперсных модификаторов на основе чистых металлов и их тугоплавких соединений. Наномодификаторы применены в таблетированном виде для ввода в никелевые расплавы.

**наномодификатор, плазмохимический синтез, никелевые сплавы, газотурбинный двигатель**

### Введение

Жаростойкие никелевые сплавы типа ЖС широко применяются при прецизионном литье лопаток газотурбинных двигателей (ГТД).

Точное литьё обеспечивает по сравнению с методами деформации более высокий КИМ = 0,6...0,8 вместо 0,1...0,2, снижение трудоёмкости изготовления и стоимости изделия.

Как показала практика [1 – 3], литьё по выплавляемым моделям – это наиболее эффективный способ изготовления охлаждаемых лопаток с усложнённой конструкцией внутренней полости.

Однако применение литейной технологии изготовления лопаток газотурбинных двигателей в серийном производстве показало необходимость усовершенствований технологического процесса литья, а также методов контроля металлургического качества лопаток с высокой разрешающей способностью.

Требования высокой геометрической точности отливок охлаждаемых лопаток связаны с необходимостью обеспечения стабильности температурного поля лопаток, а, следовательно, стабильного запаса прочности.

Поскольку прочностные свойства являются структурно чувствительными, то возрастает влияние

структуры жаропрочных и жаростойких сплавов и её отдельных элементов: границ зёрен, ликвационных областей, упрочняющих фаз.

### Формулирование проблемы

В лопатках газотурбинных двигателей из сплавов ЖСЗК-ВИ, ЖС6 с равноосной структурой наблюдалось снижение характеристик ударной вязкости, что связано с наличием дефектов поверхности и нестабильностью структуры.

Поэтому, в условиях повышенных рабочих температур лопаток турбины и требований длительной и усталостной прочности, изучение способов получения и модифицирования никелевых расплавов является актуальным.

### Предлагаемая разработка

Модифицирование расплавов является сложным и экономически целесообразным процессом. Одной из основных технических причин, сдерживающих его применение в практике литейного производства, является невысокая стабильность достигаемого эффекта, обусловленная чувствительностью процесса к свойствам шихты, условиям плавки и заливки металла [4].

Необходима критериальная оценка активности

модификаторов, основанная на сопоставлении различных физических параметров.

При этом модифицирующие добавки классифицируют на растворимые и нерастворимые в расплаве.

Для жаропрочных и жаростойких никелевых сплавов, имеющих температуру плавления выше 1600 °С, целесообразно выбирать нерастворимые модификаторы на основе титана, имеющего кубическую решётку, и его тугоплавких соединений: нитридов и карбонитридов с температурой плавления выше 2900 °С.

При этом введенные в расплав тугоплавкие частицы являются центрами кристаллизации, так как на их поверхности происходит зарождение кристаллов первичной фазы.

Происходит новое образование: частица – твёрдая фаза – расплав, которое устойчиво в случае уменьшения свободной энергии системы [5]:

$$\Delta F = \sum \Delta F_V - \sum \Delta F_S, \quad (1)$$

где  $\Delta F_V$  – изменение объёмной свободной энергии системы;

$\Delta F_S$  – изменение поверхностной свободной энергии системы.

Если считать, что частица и оболочка твёрдой фазы на её поверхности имеют форму сферы, то тогда:

$$\sum \Delta F_V = 1,33 \cdot \pi \cdot (R_0^3 - R^3) \cdot \Delta F_V; \quad (2)$$

$$\Delta F_S = S_R \cdot \sigma_{R-0} - S_0 \cdot \sigma_{0-ж}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус частицы;

$S_R$  и  $S_0$  – площадь поверхности частицы и оболочки;

$\sigma_{R-0}$  и  $\sigma_{0-ж}$  – удельная межфазная энергия на границах раздела частица-твёрдая и частица-жидкая фаза.

При радиусе вводимой частицы, незначительно превышающей дебаевский радиус для данного ме-

талла (1...10 нм) модифицирующий эффект должен быть максимальным. В данной работе в качестве наномодификатора выбрано тугоплавкое соединение Ti(CN) средним размером от 10 до 50 нм. Наномодификаторы получали способом управляемого плазмохимического синтеза (ПХС) [6]. Исходным сырьём служили некондиционные отходы ферросплавных, титано-магниевых производств.

Для генерации плазмы в установках плазмохимического синтеза используются вихревые индукционные плазмотроны с газовой стабилизацией разряда. Плазмохимическая установка для получения нанодispersных порошков состоит из технологического агрегата, питателя, узла дозирования газа, пульта сигнализации и управления, пульта подачи технологических газов, коллектора, блока нагрузочного контура, генератора и кабины.

Целевой продукт образуется при введении исходных порошков в поток азотной плазмы, имеющей температуру от 5500 до 7000 °С. Порошки плавятся и испаряются, после чего, по мере снижения температуры, происходит взаимодействие паров введенных материалов. В этих условиях реакция данных металлов с потоком азотной плазмы высокочастотного индукционного разряда не происходит.

Продуктом реакции является порошок в виде высокодисперсных частиц размером от 0,01 до 1,0 мкм, которые отделяются от охлажденного газового потока фильтрованием.

Плазмохимический синтез осуществляли в специальном технологическом агрегате, состоящем из реактора, плазмотрона, индуктора, теплообменника, фильтров для сбора целевого продукта.

Источником энергии для получения плазмы азота является высокочастотный генератор ВЧИ 11-60/1.76.

Расход тепло- и энергоносителей для производства 1 кг нанопорошка-модификатора составляет:

- газ (пропан-бутан) – 1,6 м<sup>3</sup>;
- сжатый воздух – 25 м<sup>3</sup>;
- азот – 15,0 м<sup>3</sup>;
- электроэнергия – 40 кВт;
- аргон – 0,9 м<sup>3</sup>;
- вода – замкнутый цикл.

Нанопорошки являются хорошими геттерами, материалами с развитой свободной поверхностью, способными к химической адсорбции и адгезии, и в то же время склонными к агрегатированию в вакууме и нейтральной среде, а также к окислению. Эти особенности затрудняли использование нанопорошков в качестве модификаторов. В результате выполненных исследований разработан способ плакирования наномодификаторов непосредственно в технологическом агрегате [7], позволяющий хранить наномодификаторы длительное время в негерметичных ёмкостях. На установках ПХС можно получать нанопорошки как чистых металлов, так и их соединений: карбидов, нитридов, силицидов.

Порошки наномодификатора Ti(CN) заданного размера (10...50 нм) прессовали в таблетки размером  $\varnothing 20 \times 10$  мм для удобства хранения, транспортировки и ввода в расплавы.

### Заключение

Разработана обобщённая критериальная оценка эффективности наномодифицирующих комплексов для жаростойких никелевых сплавов.

Усовершенствована технология плазмохимического синтеза порошковых отходов ферросплавных,

титано-магниевого производств для получения различных типов наномодификаторов.

Разработан способ плакирования частиц наномодификаторов, предохраняющий их от окисления.

Отработана технология таблетирования нанодисперсных модификаторов.

### Литература

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Проблемы прочности / С.Т. Кишкин, А.В. Логунов, А.И. Луковкин и др. – 1984. – № 7. – С. 46-49.
3. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1998. – 463 с.
4. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. – 1976. – 214 с.
5. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов. – М.: Металлургия, 1964. – 214 с.
6. Калинин В.Т. Структурные аспекты плазмохимического синтеза // Сб. науч. тр. Проблемы высокотемпературной техники. – Днепропетровск: ДГУ. – 1999. – С. 25-29.
7. Модификатор. Пат. РФ №2069704, МКИ С21С 1/10 / В.В. Шатов, В.Т. Калинин, В.И. Комляков. – №93048707/02; Заявл. 21.10.93; Опубл. 27.11.96. Бюл. № 33. – 4 с.

*Поступила в редакцию 15.05.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.М. Спиридонова, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.