

УДК: 669.14.44

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ НАНОДИСПЕРСНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ

Н. Е. Калинина, д. т. н., проф., А. Е. Калиновская, асп.,
А. В. Калинин, к. т. н., доц., С. И. Мамчур, к.т.н., доц..

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

1. Введение

Проблема получения дисперсных порошков металлов, сплавов и нанодисперсных соединений из них, предназначенных для различных областей техники, является актуальной и имеет важное научно-техническое значение. В последнее десятилетие интерес к этой теме существенно возрос, так как обнаружилось, что уменьшение размера кристаллитов ниже некоторой пороговой величины может приводить к значительному изменению свойств металлов и сплавов [1, 2, 3]. Такие эффекты появляются, когда средний размер кристаллических зерен не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо наблюдаются при размере зерен менее 10 нм. Изучение свойств нанодисперсных материалов требует учета не только их состава и структуры, но и дисперсности. Одним из наиболее перспективных научно-технических направлений получения материалов с заданными свойствами является модифицирование сплавов добавками из нанодисперсных композиций.

Учитывая предъявляемые высокие требования к выпускаемой продукции авиационной промышленности, в данном исследовании были разработаны и применены нанодисперсные материалы в опытном производстве деталей газотурбинного двигателя (ГТД). Для получения отливок с заданной структурой целесообразно применять модифицирование расплавов малыми добавками нанодисперсных композиций тугоплавких соединений, инициирующих процесс кристаллизации.

2. Методика экспериментального исследования

С целью повышения качества изготовления длинномерных лопаток ГТД за счет измельчения макроструктуры, наиболее эффективным является объемное модифицирование сплава нанодисперсными порошками [4,5]. Объемное модифицирование жидких расплавов связано с определенными трудностями их введения, а также и равномерным их распределением по объему расплава. В работе [6] для определения эффективности модификатора используют величину эффективного ионизационного потенциала. Вещества, имеющие величину ионизационного потенциала меньше, чем основа сплава, способствуют уменьшению размера кристаллов, а следовательно, являются активными модификаторами. Вторым фактором, который характеризует способность элемента влиять на рост кристаллов, является фактор растворимости в металлической матрице. Активный модификатор должен располагаться по границам зерен, а не входить в их состав. При этом модификатор не должен образовывать собственные кластеры, а располагаться между кластерами расплава.

Исходя из перечисленных критериев, наилучшими модификаторами для никелевых сплавов, имеющих гранецентрированную кубическую решетку

(г.ц.к.), являются тугоплавкие композиции на основе титана с г.ц.к. решеткой. При этом расхождение атомных радиусов никеля и титана минимально.

Целью работы является повышение качества лопаток ГТД за счет объемного модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК нанодисперсными композициями.

В качестве модификаторов никелевого сплава применяли нанодисперсные соединения на основе титана с размером частиц 10...100 нм.

В таблице 1 приведена характеристика тугоплавких нанодисперсных соединений для модифицирования никелевых расплавов. Соединения получены на специальной установке плазмохимического синтеза [11].

Таблица 1

Характеристика нанодисперсных соединений

Формула	Форма	Кристаллическая решетка
Ti	многогранники	г.ц.к.
TiC	многогранники	г.ц.к.
TiN	многогранники	г.ц.к.
Ti(CN)	кубическая	г.ц.к.

Методом рентгеноструктурного анализа определены кристаллографические параметры нанодисперсных соединений (табл. 2). Исследования доказали, что все соединения имеют кристаллическое строение, а значение параметров решетки согласуются с данными для массивных порошков.

С целью оптимизации макроструктуры, получения равномерной полиэдрической, мелкокристаллической структуры на турбинных лопатках было проведено модифицирование сплава ЖСЗДК нанодисперсными порошками карбонитрида титана Ti(CN) в таблетированном виде. Модификатор в виде таблеток (предварительно смешанных и спрессованных порошков титана и наномодификатора — карбонитрида титана) — диаметром 8 мм, высотой 5 мм, упаковывали в пакеты из никелевой фольги.

Таблица 2

Кристаллографические параметры нанодисперсных композиций

Формула	Сингония	Тип фазы	Период решетки, нм		Плотность, кг/м ³	Температура плавления (разложения), °С
			<i>a</i>	<i>c</i>		
TiC	кубическая	внедрения	0,4349	-	4920	3140
TiN	кубическая	внедрения	0,4243	-	5430	2950
Ti(CN)	кубическая	внедрения	0,4256	-	4950	3120

Химический состав никелевого сплава, применяемого для отливки образцов и лопаток ГТД, по нормам ОСТ1.90.126-85 и химический состав модифицированного сплава приведены в табл. 3. Из результатов, приведенных в табл. 3, видно, что химический состав модифицированного сплава ЖСЗДК отличается от немодифицированного варианта, несколько превышая содержание титана.

Химический состав никелевого сплава ЖСЗДК до и после модифицирования

Сплав	Содержание элементов, % масс.						Ni
	Al	Ti	Cr	Mo	W	Co	
немодифицированный	4,4	3,2	11,8	4,2	4,2	9,0	Основа
модифицированный	4,4	3,4	11,8	4,2	4,2	9,0	

3. Результаты экспериментального исследования

Изучение макроструктуры отливок показало, что структура металла, полученного без применения модификатора, отличается крупнокристаллическим строением. Макроструктура модифицированных лопаток однородная, мелкозернистая; размер зерна составляет 0,1-1 мм. При литье без модифицирования средний размер зерна составляет 3-10 мм. На лопатках без модифицирования, за счет действия бокового теплоотвода на кромках образуются столбчатые кристаллы, растущие перпендикулярно кромкам. Длинновой параметр кристаллов достигает в ряде случаев 7 мм.

На хвостовике лопаток сохраняется тенденция образования, в основном, полиэдрических зерен. В модифицированных лопатках их величина несколько крупнее, чем на пере, а на лопатках без модифицирования величина зерен в хвостовике и пере существенно не отличается; существенной разницы в величине зерна в различных зонах по высоте пера не отмечается.

Мелкозернистые материалы по сравнению с крупнозернистыми имеют повышенные значения твердости, сопротивление усталости, сопротивления удару и пластичности при комнатных и высоких температурах. Авторы [5] отмечают тенденцию мелкозернистых материалов к повышению длительной прочности и пластичности при кратковременном разрыве. Преимущество более мелкого зерна в литых сплавах связано со способностью более мелкозернистого материала распределять напряжения среди большего числа границ, что должно привести к пониженному уровню деформации на каждой границе. Мелкозернистая структура также характеризует локальные условия кристаллизации отдельных частей отливки и во многих случаях определяет плотность металла отливки. Таким образом, плотность зерен на единице площади для образцов с объемным модифицированием должна быть значительно выше, чем в немодифицированном сплаве. Немодифицированный сплав обладает грубой дендритной структурой с осями первого и второго порядка, причем оси второго порядка сильно развиты и сравнимы по величине с осями первого порядка. На крупнозернистый и малопластичный материал приходится большая локальная нагрузка, что способствует преждевременному растрескиванию металла по границам зерен. Для модифицированного сплава ЖСЗДК каждое зерно представляет собой дисперсные дендриты с осями первого порядка, оси второго порядка развиты незначительно.

Механические свойства сплава ЖСЗДК определяли на образцах-свидетелях, термически обработанных по режиму: закалка от температуры 1250 °С, выдержка 4 часа, с охлаждением на воздухе. Результаты испытаний образцов, отлитых по различным вариантам модифицирования, приведены в таблице 4.

Механические свойства сплава ЖСЗДК до и после модифицирования

Сплав	Механические свойства при 20 °С			
	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
немодифицированный	1063,3	17,4	24,6	30,5
модифицированный	1141,7	21,6	23,1	44,6
ОСТ 1.90.126-85	≥ 931	≥ 7,0	-	≥ 30,0

Как видно из приведенных данных, лучшие результаты показали образцы, отлитые с модифицированием. σ_B повышен на 7,4 %, δ повышено на 24,1%, КСУ – на 46,2 %. Свойства модифицированных образцов превышают требования ОСТ по характеристикам прочности, ударной вязкости и жаропрочности. Характеристики пластичности и ударной вязкости достаточно высоки для жаропрочных сплавов типа ЖС с равноосной структурой.

Микроструктуру исследовали на поперечных шлифах опытных лопаток ГТД (рис. 1). При исследовании микроструктуры модифицированных образцов установлено, что дефектов литейного происхождения типа усадочной пористости, сорových включений не отмечено; по высоте сечения пера у выходной кромки имеется некоторое измельчение микрозерен. На рисунке 1 слева представлен немодифицированный, а справа – модифицированный образец сплава ЖСЗДК.

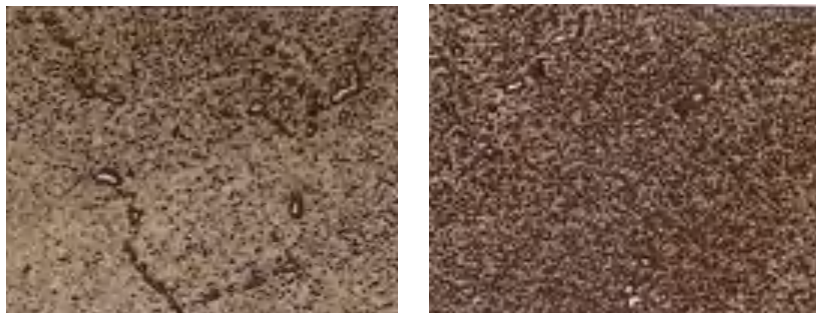


Рис. 1. Микроструктура лопаток из сплава ЖСЗДК, х 500

Порошки модификатора распределились равномерно в общей картине микроструктуры. Для получения оптимального уровня свойств жаропрочного сплава ЖСЗДК максимальную величину зерна в металле лопаток ГТД целесообразно ограничивать размером до 1 мм, особенно на кромках.

4. Выводы

В результате выполненных исследований установлено:

- в модифицированных лопатках средний размер макрозерна уменьшился с 3...10 мкм до 0,1...1 мкм, т.е. в 10...12 раз;
- в модифицированных лопатках устранена столбчатость и неравномерность структуры по высоте и сечению лопаток, имеющая место в лопатках серийного производства;
- достигнуто повышение пластических свойств: δ увеличилось с 17,4% в исходных до 21,6 % – в модифицированных образцах, что является важным показателем для длинномерных лопаток;
- достигнуто повышение ударной вязкости модифицированных образцов от 30,5 Дж/см² до 44,6 Дж/см².

Использованная литература

1. **Сабуров В.П.** Упрочняющее модифицирование стали и сплавов / В.П. Сабуров. – Литейное производство, 1988. – №9. – С. 34-41.
2. **Каблов Е.Н.** Литье лопатки газотурбинных двигателей / Е.Н. Каблов. – Москва: МИСИС, 2001. – 631 с.
3. **Глезер Г.М.** Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков: Сб. научн. тр. / Г.М. Глезер, Е.Б. Качанов, С.Т. Кишкин. – М.: ВИАМ, 1994. – С. 244-252.
4. **Химушин Ф.Ф.** Жаропрочные стали и сплавы / Ф.Ф. Химушин. – М.: Металлургия, 1969. – 748 с.
5. **Симс Ч.** Жаропрочные сплавы. Пер. с англ. / Ч. Симс, В. Хагель – М.: Металлургия, 1976. – 566 с.
6. **Неймарк В.Е.** Модифицированный стальной слиток / В.Е. Неймарк. – М.: Металлургия, 1977. – 192 с.
7. **Гуляев Б.Б.** Синтез сплавов. Выбор компонентов / Б.Б. Гуляев. – М., 1984, – 250 с.
8. **Мальцев М.В.** Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М.В. Мальцев. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
9. **Гусев А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
10. **Тушинский Л.И.** Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Л.И. Тушинский. – Новосибирск: Наука, 1990. – 245 с.
11. **Калинин В.Т.** Получение нанокристаллических композиций управляемым плазмохимическим синтезом / В.Т. Калинин, А.С. Дудников, А.Я. Качан, Н.Е. Калинин. Научно-технический журнал «Вестник двигателестроения», №1(15)/2007. – 166 с.
12. Патент РФ 2069702, МКИ6С21С 1/00. Модификатор / Калинин В.Т., Шатов В.В., Комляков В.И. - № 93030977; Заявл. 01.03.93. Опубл. 27.11.96. Бюл. № 33. – 8 с.