

УДК 669.715

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771332017119673>

Калинин А. В.¹, доцент, Кашенкова А. В.², магистр

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ

En The influence of alloying elements on the structure and properties of nickel and aluminum alloys is considered. The influence of nanomodification on the macrostructure and strength properties of the alloys ZH3DK, AMg6 and 01570 and steels 09G2S and 10G2 are investigated.

¹ Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры

² Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

Уа Розглянуто вплив легуючих елементів на структуру та властивості нікелевих і алюмінієвих сплавів. Досліджено вплив наномодифікування на макроструктуру та міцнісні властивості сплавів ЖСЗДК, АМг6 і 01570 та сталей 09Г2С і 10Г2.

Введение

Создание наноматериалов непосредственно связано с разработкой и применением нанотехнологий. На установках плазмохимического синтеза можно получать широкий спектр нанодисперсных соединений, а именно: карбиды, нитриды, карбонитриды, силициды различных элементов (*Si, Al, Ti, V, Mo* и др.), а также нанодисперсные порошки чистых металлов.

В машиностроении и ракетно-космической технике широко применяют конструкционные стали, литейные и деформируемые алюминиевые сплавы, литейные никелевые сплавы. Для вновь разрабатываемых материалов и изделий могут быть применены перспективные направления по модифицированию наночастицами сплавов различных систем легирования.

Постановка задачи

Условия работы лопаток газотурбинных двигателей нового поколения становятся все более напряженными в связи с повышением температуры на входе в турбину, увеличением скорости полета, ресурса и цикличности работы двигателя. Эти экстремальные условия требуют применения перспективных сплавов на основе никеля с принципиально новой структурой и свойствами, отличными от традиционных сплавов [1-3].

Задача материаловедения заключается в создании современных многокомпонентных сплавов со стабильной структурой, способных работать при высоких температурах и напряжениях.

В работе изучены также конструкционные стали и алюминиевые сплавы системы *Al-Mg*. В качестве модификаторов применяли нанодисперсные композиции на основе титана с размером частиц 50 ... 100 нм. Соединения получены на специальной установке плазмохимического синтеза [2, 4]. Мелкозернистые стали и сплавы в сравнении с крупнозернистыми имеют повышенные значения прочности, твердости, сопротивления усталости и пластичности. Следовательно, в мелкозернистых материалах напряжения распределяются среди большего числа границ, что приводит к пониженному уровню деформации на каждой границе. В крупнозернистых же материалах на одно зерно приходится большая локальная нагрузка, что является причиной преждевременного растрескивания по границам зерен.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования служил жаропрочный никелевый сплав ЖСЗ (табл. 1), применяемый для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя. Структурные изменения в многокомпонентном никелевом сплаве после наномодифицирования изучали металлографическим анализом на микроскопе *Neophot-2*. Для подтверждения эффективности наномодифицирования произведен микрорентгено-спектральный анализ образцов сплава ЖСЗДК до и после модифицирования. Распределение содержания легирующих и модифицирующих элементов в структурных составляющих сплава ЖСЗ определяли на многоцелевом растровом микроскопе *JSM-6360LA*, оснащенной системой энергодисперсионного микроанализа *LED2200*. Механические свойства сплава изучали на стандартном оборудовании.

Таблица 1.

Химический состав никелевого сплава

Марка сплава	Содержание химических элементов, %								
	Ni	Ti	Cr	Mo	W	Co	C	Fe	Al
ЖСЗ	Основа	2,5 ...	11,0 ...	3,8 ...	3,8 ...	8,0 ...	0,09 ...	2,0	4,0 ...
		3,2	12,0	4,5	4,5	11,0	0,12		4,8

Таблица 2.

Химический состав алюминиевого сплава Al-Mg

Марка сплава	Содержание химических элементов, %						
	Al	Mg	Mn	Cu	Si	Zn	Be
АМг6	Основа	5,8 ... 6,8	0,5 ... 0,8	0,1	0,4	0,2	0,0002 ... 0,0050

Таблица 3.

Химический состав низколегированных сталей

Марка стали	Содержание химических элементов, %						
	C	Mn	Si	S	P	Al	Ti
09Г2	≤0,13	≤1,7	≤0,35	0,010	0,020	≤0,05	≤0,035
10Г2	0,08 ... 0,13	1,56 ... 1,76	0,16	0,006		0,02	0,010

Результаты исследования

Структура многокомпонентного никелевого сплава ЖСЗ - гетерофазная, представляющая собой высокодисперсные частицы γ' -фазы (формирующейся на основе интерметаллического соединения Ni_3Al), равномерно распределённые в матрице твердого γ -раствора легирующих элементов в никеле. Все тугоплавкие легирующие элементы сплава (W , Mo , Cr) увеличивают область существования γ' -фазы. Вследствие обеднения γ -фазы тугоплавкими элементами эффективность твердорастворного упрочнения уменьшается, и, как следствие, снижается сопротивление скольжению дислокаций, что, в конечном счете, приводит к понижению жаропрочности. Алюминий и титан являются γ' -образующими, входят в γ' -твердый раствор и являются основными упрочнителями сплава. Таким образом, упрочнение сложнолегированного сплава ЖСЗ происходит за счет упрочнения γ -твердого раствора, наличия дисперсных фаз, увеличения количества γ' -фазы при рабочих температурах.

Изучение влияния легирующих элементов на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗ имеет важное практическое значение. Так, оптимальную температуру модифицирования определяли исходя из диаграмм состояния $Ni-Cr$ и $Ti-Ni$ [1].

В работе предложено модифицирование исследуемых сплавов. Согласно классической теории, существуют три вида модифицирования: измельчение первичных зерен при кристаллизации матричной фазы, изменение внутреннего строения зерен-дендритов, измельчение эвтектик [1, 5]. В статье рассмотрен вид модифицирования за счет измельчения зерен никелевого твердого раствора, что является результатом зародышевого действия тугоплавких частиц наномодификатора, специально введенных в расплав. В качестве модификатора был выбран нанодисперсный порошок карбонитрида титана $Ti(C, N)$, полученный методом плазмохимического синтеза [4].

Механизм действия наномодификатора в расплаве заключается в том, что на поверхностях частиц $Ti(C, N)$ происходит зарождение первичных кристаллов аустенитной γ -фазы. Наномодификатор диспергирует дендриты первичного аустенита в никелевом сплаве и низколегированных сталей [09Г2, 10Г2].

Исследование макроструктуры сталей и сплавов в исходном состоянии показало, что структура сплава крайне неоднородна по сечению. Исходные образцы имели крупнокристаллическую структуру с размером зерен 5...8 мм. Модифицированные образцы имели более однородную мелкозернистую структуру с размером зерен до 1 мм. Таким образом, вследствие наномодифицирования средний размер зерна уменьшился в 5 ... 8 раз.

Исследование микроструктуры сталей и сплавов показало, что в немодифицированных образцах присутствуют достаточно крупные включе-

ния, которые располагаются по границам зерен. В модифицированных образцах включения значительно дисперснее и располагаются как по границам зерен, так и внутри зерен (рис. 1).



Рис. 1. Микроструктура сплава ЖСЗ, $\times 1000$:

a – до модифицирования; *б* – после модифицирования

Формирование при модифицировании упрочненного никелевого твердого раствора и более развитой зернограницной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава ЖСЗ по сравнению с немодифицированным состоянием. Механические свойства определяли на пальчиковых образцах после стандартной термоупрочняющей обработки. Достигнуто значительное повышение прочностных и пластических свойств: σ_B повышен на 10 %; σ_T – на 11%; δ – на 23%; значительно повысилась ударная вязкость – на 31%.

Для подтверждения эффективности действия $Ti(CN)$ как наномодификатора проведен микрорентгеноспектральный анализ образцов сплава ЖСЗ. Сравнительный анализ полученных данных показал наличие в модифицированном образце всплеска интенсивностей Ti , C и N , что подтверждает модифицирующий эффект $Ti(C, N)$.

Наличие повышенного содержания титана и углерода и отсутствие азота в некоторых участках структуры свидетельствуют о диссоциации частиц $Ti(CN) \rightarrow TiC+N$. Микрорентгеноспектральным анализом доказана эффективность наномодифицирования карбонитридом титана никелевого сплава ЖСЗ, алюминиевого сплава АМг6 и сталей 09Г2, 10Г2 [6 ... 8].

Основной механизм влияния нанодисперсных частиц на формирование структуры алюминиевого сплава и низколегированных сталей при кристаллизации состоит в том, что основная их масса выталкивается фронтом кристаллизации в жидкую фазу и принимает участие в измельчении структурных составляющих.

При сравнении характеристик алюминиевых сплавов АМг6 и 1570 по пределу текучести и пределу прочности наблюдается повышение данных характеристик в сплаве АМг6 с 0,5% скандия [5, 6]. Для сплава 1570

предел текучести выше на 40%, а предел прочности выше на 20% в сравнении со сплавом АМг6. Пластичность сплава 1570 находится на достаточно высоком уровне ($\delta=16\%$). Механические свойства алюминиевых сплавов приведены в табл. 4.

Таблица 4.

Механические свойства алюминиевых сплавов

Сплав	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
АМг6	315	154	15
1570	434	341	16

Результаты исследования модифицированной структуры показали, что сплав 1570 имеет мелкозернистую структуру с первичными интерметаллидами Al_3Sc внутри зерен.

Микроструктура сварных соединений сплава 1570 характеризуется мелкодисперсными выделениями интерметаллидных фаз в металле шва и зоне сплавления, что благоприятно сказывается на характеристиках вязкости разрушения.

Выводы

На основе классической теории модифицирования для многокомпонентных сплавов на основе никеля, алюминия и железа выбран нанодисперсный модификатор – карбонитрид титана $Ti(CN)$ с размером частиц до 100 нм, получаемый методом плазмохимического синтеза. Исследовано влияние модифицирования на структуру и свойства никелевого сплава ЖСЗ, алюминиевых сплавов АМг6 и 1570 и сталей 09Г2, 10Г2. Микроструктура всех сплавов после модифицирования более однородна и мелкодисперсна. Достигнуто измельчение зерна сплавов после модифицирования в 3 ... 8 раз, вследствие чего значительно повысились прочностные свойства. Усвояемость наномодификатора в сплавах доказана методом микрорентгеноспектрального анализа.

Список использованной литературы

1. Богуслаев В. О., Качан О. Я., Калініна Н. Є. Авіаційно-космічні матеріали та технології / В. О. Богуслаєв, О. Я. Качан, Н. Є. Калініна // – Запоріжжя: Мотор Сич, 2005. – 385 с.
2. Калинина Н. Е. Технологические особенности наномодифицирования литейных жаропрочных никелевых сплавов / Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В. Г. Калинин // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 4(31). – С. 54–56.
3. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. - М.: МИСИС, 2001. – 631 с.

4. *Калинина Н. Е.* Особенности наномодифицирования многокомпонентных никелевых сплавов / Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В. Г. Калинин и др. // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2012. – № 7(94). – С. 23–26.
5. *Елагин В. И.* Алюминиевые сплавы, легированные скандием / В. И. Елагин, В. В. Захаров, Т. Д. Ростова // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1992. – № 1. – С. 24–28.
6. *Ищенко А. Я.* Свариваемые алюминиевые сплавы со скандием / А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур // *К.: КВ1Ц, 1999.* – 116 с.
7. *Энциклопедия машиностроения/ Под ред. К. Ф. Фролова.* –Т. II-2. *Стали и чугуны-* М. Машиностроение, 2001–126 с.