

УДК 669.245:629.7

**Н. Е. КАЛИНИНА¹, Е. А. ДЖУР¹, В. Т. КАЛИНИН², И. Ю. КОШЕЛЕВА¹,
В. П. БЕЛОЯРЦЕВА¹**

¹ Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Украина

² Национальная металлургическая академия, Украина

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Приведены результаты экспериментальных и опытно-промышленных испытаний комплекса механических свойств и коррозионной стойкости многокомпонентного жаропрочного никелевого сплава ЖС6У-ВИ, применяемого для изготовления лопаток газотурбинных двигателей. Разработан технологический режим модифицирования никелевого расплава дисперсными композициями на основе карбида титана. Исследованы особенности формирования структуры модифицированного сплава, а также комплекс прочностных пластических свойств. Достигнуто значительное измельчение зерна сплава в результате модифицирования, что обусловило повышение прочностных свойств до 15% и ударной вязкости до 40%. Повышена коррозионная стойкость сплава ЖС6У-ВИ в окислительной среде, глубина коррозии при температуре 1000 °С уменьшилась на 25% по сравнению с немодифицированным сплавом. Повышение стойкости и высокотемпературной коррозии связано с более равномерным распределением избыточных фаз в структуре модифицированного сплава.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, механические свойства, структура, высокотемпературная коррозия, модифицирование

Введение

Повышение качества и эксплуатационных свойств изделий авиакосмической техники может быть успешно решено при разработке и усовершенствовании существующих материалов. В современных авиационных газотурбинных двигателях ГТД на долю жаропрочных сплавов приходится до 40% массы двигателя. При этом работоспособность всего авиационного двигателя определяется работоспособностью лопаток турбины. Условия работы лопаток в ГТД нового поколения становятся все более напряженными в связи с повышением температуры газа на входе в турбину, увеличением скорости полета, ресурса и цикличности работы двигателя. Эти экстремальные условия требуют применения перспективных материалов с улучшенной структурой и свойствами.

Эффективным способом измельчения структурных составляющих сплавов на макро- и микроуровнях являются модифицирование

многокомпонентных сплавов дисперсными композициями [1,5].

1. Постановка задачи исследования

Задача материаловедения заключается в создании современных высокожаропрочных сплавов со стабильной структурой, способных работать при высоких температурах и напряжениях. Целью данной работы является разработка технологии модифицирования никелевого сплава системы Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co дисперсными композициями, полученными методом плазмохимического синтеза. Необходимо изучить структурные изменения в сплавах, взаимосвязь структуры со свойствами и влияние легирующих элементов на структурообразование в многокомпонентных никелевых сплавах.

Материал исследований. Материалом исследования служил жаропрочный никелевый сплав ЖС6У-ВИ, применяемый для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав жаропрочного никелевого сплава

Марка сплава	Содержание элементов, % масс.								
	Al	Ti	Cr	Mo	W	Co	C	Mn, Si	Ni
ЖС6У-ВИ	5,2-5,8	2,2-2,8	8,6-9,3	1,2-1,6	9,8-10,5	9,4-10,4	0,13-0,19	≤0,2	Осн.

Результаты исследований

Разработана технологии ввода модификатора в расплав, включающая: оптимизацию состава комплексного модификатора; определение способа ввода модификатора в расплав; установление температурно-временного режима плавки, выпуска и заливки расплава в форму.

Для ввода порошков модификатора в расплав разработана технология, состоящая из трех этапов. На первом этапе методом порошковой металлургии в атриторе смешивали порошки никелевого сплава с порошком модификатора. На втором этапе проводили прессование порошков в стальной прессформе. Третьим этапом являлась введение порошка в жидкий расплав жаропрочного никелевого сплава [2].

Атриторную обработку смесей порошков проводили в три этапа. На первом происходило расплющивание и размол отдельных частиц; на втором – разрушение и перестройка структуры частиц за счет холодного сваривания разнородных частиц и образования слоистой структуры; третьим этапом являлось истончение компонентов слоев и повышение внутренней однородности частиц. Теоретической основой атриторной обработки является представление о системе шары-порошок как многокомпонентной вязкой жидкости, интенсивность перемещения компонентов которой определяется турбулентной диффузией. При вращении мешалки в движение приводится вся масса шаров, находящихся в рабочей камере. Непосредственно мешалкой приводится во вращение относительно небольшое количество шаров, остальные приводятся в движение путем эстафетной передачи импульсов от шара к шару.

С целью оптимизации макроструктуры, получения равномерной полиэдрической, мелкокристаллической структуры на лопатках было опробовано модифицирование сплава ЖС6У-ВИ дисперсными композициями в таблетированном виде. Прессование производили на гидравлическом прессе в стальных прессформах [2]. Исследованы различную дозировку модификатора: 0,1 и 0,2% масс. из учета 50%-ного усвоения расплавов.

Основой модификатора авторами предложен дисперсный модификатор-карбид титана Ti(C). Состав спрессованных таблеток: порошок Ti(C) и Ti размером менее 1 мкм; порошок Al размером 20 мкм; Al-пудра [3].

Таблетка комплексного модификатора, попадая в расплав, растворяется в нем и равномерно распределяется по объему расплава путем индукционного перемешивания.

Предложенная методика позволяет с минимальными потерями вводить необходимое

количество модификатора и гарантировать равномерное распределение в расплаве. Ввод модификатора осуществляли на том технологическом этапе плавки, который обеспечивает максимальный технический эффект. Температурно-временные параметры модифицирования: $t = 1650 \pm 10$ °C; $t = 5$ минут.

Структура многокомпонентного никелевого сплава ЖС6У-ВИ – гетерофазная, представляющая собой высокодисперсные частицы γ^1 – фазы (формирующейся на основе интерметаллического соединения Ni₃Al), равномерно распределенные в матрице из твердого γ – раствора легирующих элементов в никеле. Тугоплавкие легирующие элементы (W, Mo, Cr) увеличивают область существования γ^1 – 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^1 – образующими, входят в γ^1 твердый раствор и являются основными упрочнителями. Элементы Co, Mo, и Cr входят в γ – твердый раствор. Наличие W одинаково и в γ , и в γ^1 твердом растворе. Таким образом, упрочнение сложнoleгированного никелевого сплава происходит за счет: упрочнения γ твердого раствора и наличие дисперсных фаз.

Температуру модифицирования определяли исходя из диаграмм состояния Ni-Cr и Ti-Ni [4,6].

Согласно классической теории, существует три вида модифицирования: измельчение первичных зерен при кристаллизации матричной фазы; изменение внутреннего строения зерен – дендритов; измельчение эвтектик. Применен способ модифицирования [7] за счет измельчения зерен никелевого твердого раствора, что является результатом зародышевого действия тугоплавких частиц модификатора, специально введенных в расплав. Механизм действия модификатора в расплаве заключается в том, что на поверхностях частиц TiC происходит зарождение первичных кристаллов аустенитной γ – фазы.

Исследование макроструктуры сплава в исходном состоянии показало, что структура сплава крайне неоднородна по сечению. Исходные образцы имели крупнокристаллическую структуру с размером зерен 3-5 мм. Модифицированные образцы имели однородную, мелкозернистую структуру с размером зерен до 1 мм. Таким образом, вследствие модифицирования средний размер зерна уменьшился в 3 раза.

Формирование при модифицировании упрочненного никелевого твердого раствора

и более развитой зернограницной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава по сравнению с немодифицированным состоянием: σ_B повышен на 8...10%; $\sigma_{0,2}$ – на 11...14%; δ – в 1,1...1,3 раза; КСУ резко повышена на 40% (рис. 1).

О жаростойкости сплава судили по результатам испытаний на высокотемпературную коррозию в окислительной атмосфере. После

каждой термоэкспозиции измеряли глубину межкристаллической коррозии. Установлено, что во всех образцах имело место внутреннее окисление. Более интенсивное высокотемпературное окисление наблюдали в немодифицированном образце глубиной

~ 40 мкм по сравнению с модифицированным образцом, где глубина коррозии составила 30 мкм. Таким образом, достигнуто снижение коррозионного повреждения сплава на 25%.

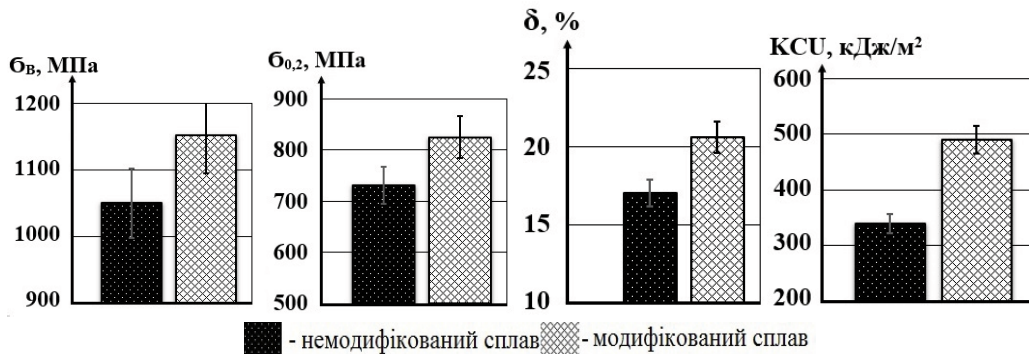


Рис.1. Механические свойства никелевого сплава ЖС6У-ВИ до и после модифицирования

Заключение

Установлено, что комплексное модифицирование жаропрочного никелевого сплава ЖС6У-ВИ влияет на формирование мелкодисперсной структуры с равномерным распределением легирующих элементов.

В результате введение в расплав дисперсных частиц карбида-титана достигнуто значительное измельчение зерна сплава от 3...5 мм в исходном, до 1 мм в модифицированном состоянии.

Формирование при модифицировании более развитой зернограницной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава ЖС6У-ВИ. Достигнуто повышение предела прочности σ_B на 8...10%; предела текучести $\sigma_{0,2}$ – на 10...14%; относительного удлинения в 1,1...1,3 раза; ударной вязкости КСУ на 40%.

После испытаний на жаростойкость, глубина межкристаллической коррозии в модифицированном сплаве уменьшена в среднем на 25%, что характеризует высокую эксплуатационную стойкость сплава.

Литература

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей [Текст] : монография / Е. Н. Каблов. - М. : МИСИС. - 2001. - 631 с.
2. Калинина Н. Е. Технологические особенности наномодифицирования литейных

жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В. Т. Калинин // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – Сумы. МИКЭМ. – 2013. - №1. – С. 54-56.

3. Декл. Пат. 82163 Україна на корисну модель МПК С22С 19/03. Комплексний модифікатор нікелевих сплавів [Текст] / Н. Є. Калініна, А. Є. Калиновська, В. Т. Калінін, З. В. Вілішук, Т. В. Носова. ДНУ. - № u 2013 00612; заявл. 17.01.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. №14.-7 с.

4. Особенности наномодифицирования многокомпонентных никелевых сплавов [Текст] / Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В. Т. Калинин [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. –2012. - №7(94). – С. 23-26.

5. Симс Ч. Суперсплавы: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [Текст] : пер. с англ. / Ч. Симс. – М. : Металлургия. - 1995. – 384 с.

6. Лакишев Н. П. Диаграммы равновесия двойных металлических систем [Текст] : справочник / Н. П. Лякишев. – М. : Машиностроения. - 1997. – 56 с.

7. Saunders N. The Application of CALPHAD Calculations to Ni- based Superalloys [Text] / M. Saunders, M. Fahrman, S. Y. Small // In «Superalloys 2000»; eds. K. A. Green, T. M. Pollock and R. D. Kissinger. – TMS, Warrendate, 2000. - 803 p.

Поступила в редакцию 02.06.2016

Н. Є. Калініна, Є. А. Джур, В. Т. Калінін, І. Ю. Кошелева, В. П. Білоярцева. Підвищення механічних і корозійних властивостей багатокомпонентних жароміцних сплавів

Наведено результати експериментальних і дослідно - промислових випробувань комплексу механічних властивостей та корозійної стійкості багатокомпонентного жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У-В, застосовуваного для виготовлення лопаток газотурбінних двигунів. Розроблено технологічний режим модифікування нікелевого розплаву дисперсними композиціями на основі карбиду титану. Досліджено особливості формування структури модифікованого сплаву, а також комплекс міцності пластичних властивостей. Досягнуто значне подрібнення зерна сплаву в результаті модифікування, що зумовило підвищення міцності властивостей до 15% і ударної в'язкості до 40%. Підвищено корозійну стійкість сплаву ЖС6У-В в окислювальному середовищі, глибина корозії при температурі 1000 °С зменшилася на 25% в порівнянні з немодифікованим сплавом. Підвищення стійкості і високотемпературної корозії пов'язано з більш рівномірним розподілом надлишкових фаз в структурі модифікованого сплаву.

Ключові слова: жароміцний сплав, механічні властивості, структура, високотемпературна корозія, модифікування.

N.E Kalinina, E. A Dzhur, V.T Kalinin, I. Y. Kosheleva, V.P Beloyartseva. Increasing the mechanical and corrosion properties of multicomponent high-temperature alloys

The results of experimental and developmental promeshlennyh test complex mechanical properties and corrosion resistance of a multi-resistant nickel alloy ZhS6U -VI used for the manufacture of gas turbine engine blades. The technological regime modification nickel dispersed melt compositions based on titanium carbide . The features of the formation of the modified structure of the alloy, as well as a set of strength properties of the plastic. A substantial grain refinement alloy as a result of modification , resulting in improvement of strength properties and 15% and toughness to 40%. Improved corrosion resistance ZhS6U -VI alloy in an oxidizing environment at temperature corrosion depth 1000 °C decreased by 25% as compared to the unmodified alloy. Increased resistance and high temperature corrosion due to the more uniform distribution of phases in the redundant structure of the modified alloy.

Key words: superalloy mechanical properties, structure, high temperature corrosion, modification.