

УДК 669.715

Н. Е. Калинина, Е. А. Джур, С. И. Мамчур, А. А. Шахов

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Запропоновано модифікувати складнолегований нікелевий сплав. Вивчено вплив легуючих елементів на структуроутворення і властивості досліджуваного сплаву. Доведено засвою-ваність модифікатора. Вивчено структурні зміни у сплаві після модифікування, внаслідок чого підвищено рівень механічних властивостей.

Ключові слова: *нікелевий сплав, легуючі елементи, модифікування, зерно, структуроутворення, механічні властивості.*

Предложено модифицировать сложнолегированный никелевый сплав. Изучено влияние легирующих элементов на структурообразование и свойства исследуемого сплава. Доказана усвояемость модификатора. Изучены структурные изменения в сплаве после модифицирования, в следствии чего повышен уровень механических свойств.

Ключевые слова: *никелевый сплав, легирующие элементы, модифицирование, зерно, структурообразование, механические свойства.*

Proposed to modify the complex-nickel alloy. The effect of alloying elements on structure and properties of the alloy. Proved digestibility modifier. The structural changes in the alloy after the modification, whereby elevated levels of mechanical properties.

Keywords: *nickel alloy, alloy elements, modifying, grain, structure, mechanical properties.*

Введение. Научно-технический прогресс является объективной постоянно действующей закономерностью развития производства авиационных двигателей, что невозможно без опережающего развития всех отраслей науки и прежде всего материаловедения[1]. Основной тенденцией развития авиадвигателестроения является непрерывное увеличение температуры газов перед турбиной, обуславливающей повышение требований к конструкции, надежности и ресурсов работы лопаток турбины, что невозможно без применения качественно новых материалов.

Постановка задачи. Задача материаловедов заключается в создании современных высокожаропрочных сплавов со стабильной структурой, способных работать при высоких температурах и напряжениях. Целью данной работы является разработка способа модифицирования и изучение структурных изменений в жаропрочных никелевых сплавах. Эти сплавы по своему химическому составу являются наиболее сложными из всех существующих сплавов конструкционного назначения. Они содержат не менее 6 основных легирующих элементов, не считая многих полезных микродобавок(табл.1). Поэтому изучение влияния легирующих элементов на структурообразование в многокомпонентных никелевых сплавах является также целью данной работы.

В табл.1 приведён химический составляющих сплавов.

Таблица 1
Химический состав исследуемых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, % мас.								
	Al	Ti	Cr	Mo	W	Co	C	Fe	Ni
ЖС6У-ВИ	5,1-6,0	2,0-2,9	8,0-9,5	1,2-2,4	9,5-11,0	9,0-10,5	0,13-0,2	1,0	Осн.
ЖС6К	5,0-6,0	2,5-3,2	9,5-12,0	3,5-4,8	4,5-5,5	4,0-5,5	0,13-0,2	2,0	
ЖСЗДК	4,0-4,8	2,5-3,2	11,0-12,0	3,8-4,5	3,8-4,5	8,0-10,0	0,09-0,12	≤ 2,0	

Методы и способы исследования. Материалом исследования служил жаропрочный никелевый сплав ЖС6У, применяемый для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя [2]. Изучение структурных изменений в много-компонентном никелевом сплаве после модифицирования проводили при помощи металлографического анализа на микроскопе Neophot-2. Для подтверждения эффективности модифицирования был проведён микрорентгеноспектральный анализ образцов сплава ЖС6У до и после модифицирования. Распределение содержания легирующих и модифицирующих элементов в структурных составляющих сплава ЖС6У определяли на многоцелевом растровом микроскопе JSM-6360LA, оснащённым системой рентгено спектрального энерго-дисперсионного микроанализа JED2200.

Результаты и их обсуждения. Структура многокомпонентного никелевого сплава ЖС6У – гетерофазная, представляющая собой высокодисперсные частицы γ' -фазы (формирующийся на основе интерметаллического соединения Ni_3Al), равномерно рассеянные в матрице из твёрдого γ -раствора легирующих элементов в Ni. В никелевом сплаве ЖС6У, по сравнению со сплавами ЖС6У-ВИ и ЖС6К, содержится меньше углерода, который снижает температуру солидуса. Все тугоплавкие легирующие элементы: W, Mo, Cr – увеличивают область существования γ' -фазы.

Вследствие обеднения γ' -фазы тугоплавкими элементами эффективность твёрдорастворного упрочнения уменьшается, и, как следствие, снижается сопротивление скольжению дислокаций, что в конечном счёте приводит к понижению жаропрочности. Al и Ti являются γ' -образующими элементами, входят в γ' твёрдый раствор и являются основными упрочнителями. Co, Mo, Cr входят в γ твёрдый раствор. Наличие W одинаково и в γ , и в γ' -твёрдый растворе.

Таким образом, упрочнение рассматриваемых сложно-легируемого сплава ЖС6У происходит за счёт: упрочнения γ' -твёрдого раствора; наличия дисперсных фаз; увеличения процента γ' -фазы; высокой температуры солидуса; уменьшения скорости укрупнения γ' -фазы при рабочих температурах.

Изучение влияния легирующих элементов на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖС6У имеет большое практическое значение. Так, оптимальную температуру модифицирования определяли исходя из диаграммы состояния Ni-Cr и Ti-Ni (рис.1)[3].

В данной работе предложено модифицировать исследуемый сплав ЖС6У. Согласно классической теории, существует 3 вида модифицирования: измельчение первичных зёрен при кристаллизации матричной фазы; изменение внутреннего строения зерен-дендритов; измельчения эвтектик. Был рассмотрен вид модифицирования за счёт измельчения зерен никелевого твердого раствора, что является результатом зародышевого действия тугоплавких частиц модификатора, специально введённых в расплав. В качестве модификатора был выбран дисперсный порошок карбонитрида титана Ti(CN), полученный методом плазмохимического синтеза [4].

Механизм действия модификатора в расплаве заключается в том, что на поверхностях частиц Ti(CN) происходит зарождения первичных кристаллов аустенитной γ -фазы. Модификатор диспергирует дендриты первичного аустенита в сплаве ЖС6У [5,6].

Для подтверждения эффективности действия Ti(CN) как модификатора проведён микрорентгеноспектральный анализ образцов сплава ЖС6У до и после модифицирования. В немодифицированном образце количество титана и углерода соответствует их содержанию в сплаве, содержание азота не обнаружено. Сравнительный анализ полученных данных показал наличие в модифицированном образце всплеска интенсивностей Ti, C и N, что подтверждает модифицирующий эффект Ti(CN) (табл.2).

Таблица 2

Химический состав исследуемых зон никелевого сплава ЖС6У

Состояние сплава	Содержание элементов, % мас.						
	C	N	Ti	Ni	Mo	W	Cr
Модифицированный	4,43	0,87	52,52	4,64	14,55	20,28	1,69
Не модифицированный	3,81	0	37,16	14,36	16,85	17,44	5,19

Наличие повышенного содержания титана и углерода и отсутствие азота в некоторых участках структуры свидетельствует, очевидно, о диссоциации

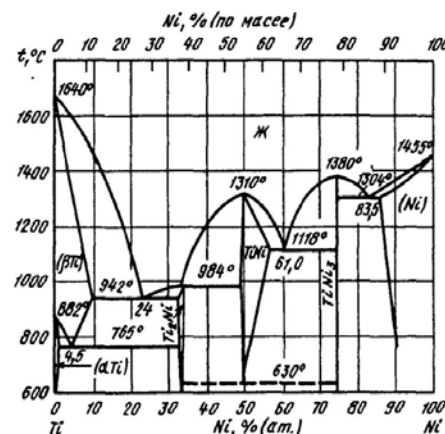


Рис.1 Диаграмма состояния Ti-Ni

частиц $Ti(CN) \rightarrow TiC + N_{ат}$. При этом прибор регистрирует только TiC. Таким образом, микрорентгеноспектральным анализом доказано эффективность модифицирования карбонитридом титана никелевого сплава ЖС6У.

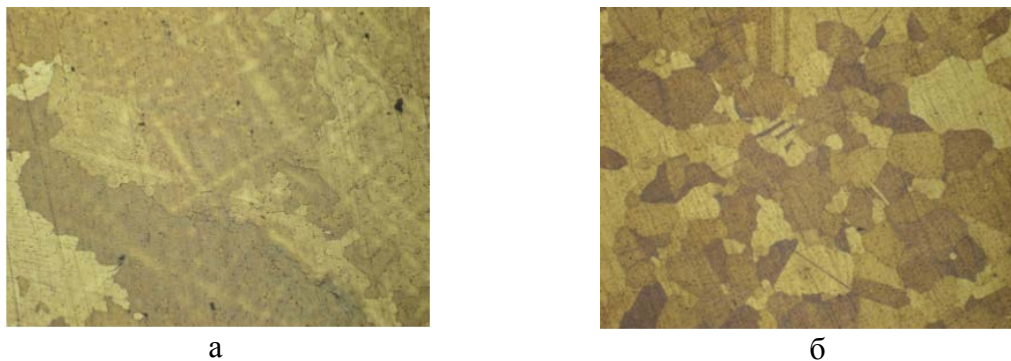


Рис.2 Макроструктура никелевого сплава ЖС6У, х50: а - до модифицирования, б – после модифицирования

Исследование микроструктуры сплава в исходном состоянии показало, что структура сплава крайне неоднородна по сечению. Исходные образцы имели крупнокристаллическую структуру с размером зёрен от 5 до 8 мм. Модифицированные образцы имели более однородную, мелкозернистую структуру с размером зёрен до 1 мм. Таким образом вследствие модифицирования средний размер зерна уменьшился в 5...8 раз (рис.2).

Исследования микроструктуры показало, что в немодифицированном образце заметны достаточно крупные включения, которые располагаются по границам зёрен. В модифицированном образце включения действительно дисперснее и располагаются как по границам зёрен, так и внутри зеренно (рис.3).

Формирование при модифицировании упрочнённого никелевого твёрдого раствора и более развитой зернограничной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава ЖС6У (предела прочности σ_B , предела текучести σ_T и пластичности δ) по сравнению с немодифицированным его состоянием. Механические свойства определяли на пальчиковых образцах после стандартной термоупрочняющей обработки. Достигнуто значительное повышение прочностных и пластических свойств: σ_B повышено на 9,3%; σ_T – на 12,9%; δ – на 21,2%.

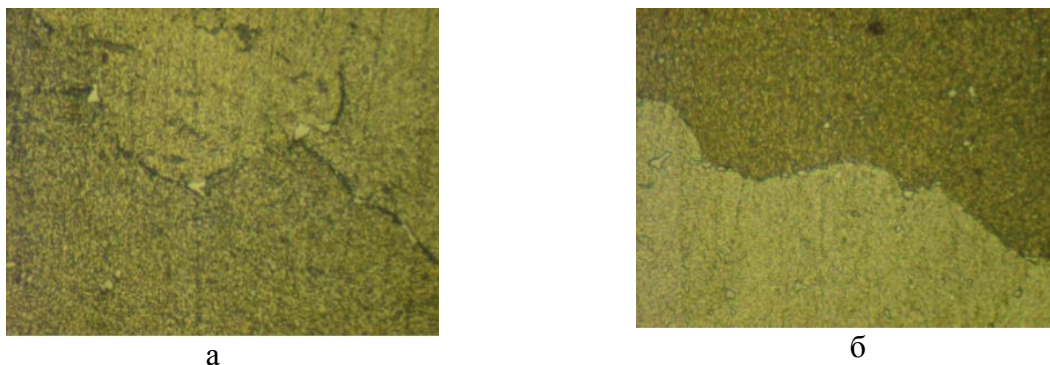


Рис.3 Микроструктура сплава ЖС6У, x1000: а-до модифіцирования; б – после модифіцирования

Выводы. В данной работе рассмотрено влияние легирующих элементов на структуру и свойства никелевых сплавов. Предложена модифицировать жаропрочный никелевый сплав ЖС6У, применяемый для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя. На основе классической теории модифицирование для жаропрочных никелевых сплавов выбран дисперсный модификатор-карбонитрид титана (TiCN), получаемый методом плазмохимического синтеза. Исследовали влияние модифицирования на структуру и свойства сплава ЖС6У; макроструктура сплава после модифицирования более однородная и мелкодисперсная. Достигнуто измельчение зерна после модифицирования в 5...8 раз, вследствие чего значительно повысились механические свойства. Усвояемость модификатора доказана методом микрорентгеноспектрального анализа.

Библиографические ссылки

1. Богуслаев В. А. Технология производства авиационных двигателей. – Изд. 2-е / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой, Е. Я. Корневский. – Запорожье: Изд-во ОАО «Моторсич», 2004 г. – 945 с.
2. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей / Е.Н. Каблов. – М.: МИСИС, 2001. – 631с.
3. Калинина Н. Е. Технологические особенности наномодифицирования литейных жаропрочных никелевых сплавов / Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В.Т. Калинин // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. - № 1(31). – С.54-56.
4. Наноматериалы и нанотехнологии: получение, строение, применение: монография / Н. Е. Калинина, В.Т. Калинин, З. В. Вилищук и др. – Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2012. – 192 с.
5. Мальцев, М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов [Текст] / М.В. Мальцев. – М. : Металлургия, 1970. – 368 с.
6. Патент РФ 2069702, МКИ6С21С 1/00. Модификатор [Текст] / Калинин В. Т., Шатов В. В, Комляков В. И. – № 93030977 ; Заявл. 01.03.93 ; Оpubл. 27.11.96. –Бюл. №33. – 8с

Надійшла до редколегії 10.08.2017