

УДК 669.715

Н.Е. КАЛИНИНА¹, А.Е. ЮХИМЕНКО¹, В.Т. КАЛИНИН²¹Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара²Национальная металлургическая академия Украины

КОМПЛЕКСНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

В результате проведенных исследований по модифицированию многокомпонентного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ для лопаток газотурбинных двигателей установлено, что введение комплексного модификатора на основе нанопорошка карбонитрида титана в расплав приводит к существенному изменению микроструктуры сплава. Наночастицы карбонитрида титана служат дополнительными центрами кристаллизации. Формирование при модифицировании мелкозернистой структуры и упрочненного твердого раствора приводит к повышению механических и эксплуатационных свойств сплава, что имеет важное практическое значение.

Ключевые слова: модифицирование, никелевый сплав, наноконпозиции, микроструктура, механические и эксплуатационные свойства.

Введение

Разработка ответственных изделий для металлургии и машиностроения требует повышения механических свойств, жаропрочности, жаростойкости и эксплуатационных свойств конструкционных материалов. В авиации и турбостроении применяют жаропрочные многокомпонентные никелевые сплавы, которые должны иметь структурную термостабильность, высокую жаропрочность, длительную прочность.

В проблеме повышения эксплуатационной надежности и долговечности изделий материаловедение является определяющим, поскольку оптимально выбранные качественные материалы способны обеспечить высокий ресурс и эффективность работы при температурах до 1100 °С в течение сотен часов при высоких статических и динамических нагрузках.

В современных авиационных газотурбинных двигателях 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 является модифицирование

многокомпонентных сплавов нанодисперсными композициями [1].

1. Постановка задачи

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 нанодисперсными 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.

2. Материал и методы исследований

Материалом исследования служил жаропрочный никелевый сплав ЖСЗДК-ВИ, применяемый для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя (табл. 1).

Таблица 1
Химический состав исследуемого никелевого сплава

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

Структуру и распределение структурных составляющих в многокомпонентном никеле-

левом сплаве после наномодифицирования проводили при помощи металлографического анализа на микроскопе Neophot-2. Распределение легирующих элементов изучали энергодисперсионным анализом образцов до и после модифицирования на многоцелевом растровом микроскопе JSM-6360LA, оснащенном системой рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа JED2200.

Для определения уровня жаропрочности сплава ЖСЗДК-ВИ, образцы были подвержены стендовым испытаниям на долговечность.

3. Результаты исследований

Разработана технология ввода наномодификатора в расплав, включающая: оптимизацию состава комплексного наномодификатора; 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 пресс-форме. Третьим этапом являлось введение порошка в жидкий расплав жаропрочного никелевого сплава.

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 ЖСЗДК-ВИ нанодисперсными композициями в таблетированном виде. Прессование производили на гидравлическом прессе в стальных

пресс-формах с усилием 35 тонн на 1 таблетку [2]. Исследовали различную дозировку наномодификатора: 0,1 и 0,2% мас. из учета 50%-ного усвоения расплавом.

Основой модификатора авторами предложен нанодисперсный модификатор – карбонитрид титана $Ti(C,N)$, соответствующий ТУ У 24.6-2424050-001-2002. Состав спрессованных таблеток: нанопорошок $Ti(C,N)$ и Ti размером 50...100 нм; порошок Al размером 20...40 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, т.е. в конце плавки. Температурно-временные параметры модифицирования: $t = 1600 \pm 10$ °С; $\tau = 3...5$ минут.

Структура многокомпонентного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ – гетерофазная, представляющая собой высокодисперсные частицы γ' -фазы (формирующейся на основе интерметаллического соединения Ni_3Al), равномерно рассеянные в матрице из твердого раствора легирующих элементов в никеле. Все тугоплавкие легирующие элементы (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. Элементы Co , Mo и Cr входят в γ -твердый раствор. Наличие W одинаково и в γ , и в γ' твердом растворе. Таким образом, упрочнение сложнелегированного сплава ЖСЗДК-ВИ происходит за счет: упрочнения γ твердого раствора; наличия дисперсных фаз; увеличения процента γ' -фазы; уменьшения скорости укрупнения γ' -фазы при рабочих температурах.

Изучение влияния легирующих элементов на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ имеет важное практическое значение. Так, оптимальную температуру модифицирования определяли исходя из диаграммы состояния $Ni-Cr$ и $Ti-Ni$ [4].

В работе проведено модифицирование исследуемого сплава. Согласно классической тео-

рии, существует три вида модифицирования: измельчение первичных зерен при кристаллизации матричной фазы; изменение внутреннего строения зерен-дендритов; измельчение эвтектик. Был рассмотрен вид модифицирования за счет измельчения зерен никелевого твердого раствора, что является результатом зародышевого действия тугоплавких частиц наномодификатора, специально введенных в расплав.

Механизм действия наномодификатора в расплаве заключается в том, что на поверхностях частиц Ti(CN) происходит зарождение первичных кристаллов аустенитной γ -фазы. Наномодификатор диспергирует дендриты первичного аустенита в сплаве ЖСЗДК-ВИ.

Исследование макроструктуры сплава в исходном состоянии показало, что структура сплава крайне неоднородна по сечению. Исходные образцы имели крупнокристаллическую структуру с размером зерен 3...10 мм. Модифицированные образцы имели более однородную, мелкозернистую структуру с размером зерен до 1 мм. Таким образом, вследствие наномодифицирования средний размер зерна уменьшился в 6...10 раз (рис. 1).



а – до модифицирования

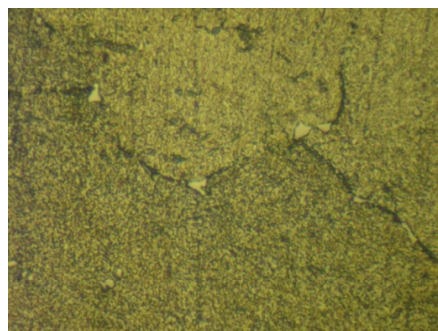


б – после модифицирования

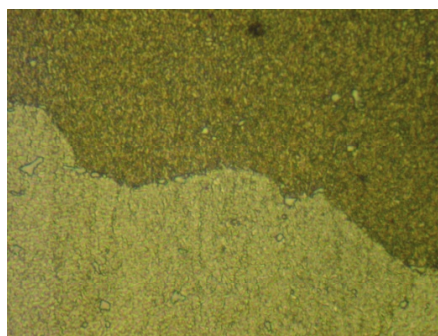
Рис. 1. Макроструктура сплава ЖСЗДК-ВИ, $\times 50$

Исследование микроструктуры сплава показало, что в немодифицированном образце присутствуют достаточно крупные включения различной морфологии, которые располагаются по границам зерен. Тугоплавкие карбиды

образуются на стыке зерен, что значительно снижает прочностные характеристики сплава – они могут служить очагом разрушения. Некоторые включения достигали 14 мкм. В модифицированном сплаве включения значительно дисперснее и располагаются преимущественно внутри зерен (рис. 2).



а – до модифицирования



б – после модифицирования

Рис. 2. Микроструктура сплава ЖСЗДК-ВИ, $\times 1000$

Модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ приводит к существенному изменению структуры. Образования тугоплавких упрочняющих фаз имеют размер одного порядка 1...3 мкм, равномерно распределены по всему объему сплава, не выстраиваются в группы. Размер включений уменьшился в 4...5 раз по сравнению с исходным состоянием.

Формирование при модифицировании упрочненного никелевого твердого раствора и более развитой зернограницной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава ЖСЗДК-ВИ (предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и ударной вязкости) по сравнению с немодифицированным состоянием. Механические свойства определяли на пальчиковых образцах после стандартной термоупрочняющей обработки. Достигнуто значительное повышение прочностных и пластических свойств: σ_B удалось повысить на 8...10%; σ_T – на 11...13 %; δ – в 1,1...1,3 раза; KCU резко повышена на 40...44% (рис. 3).

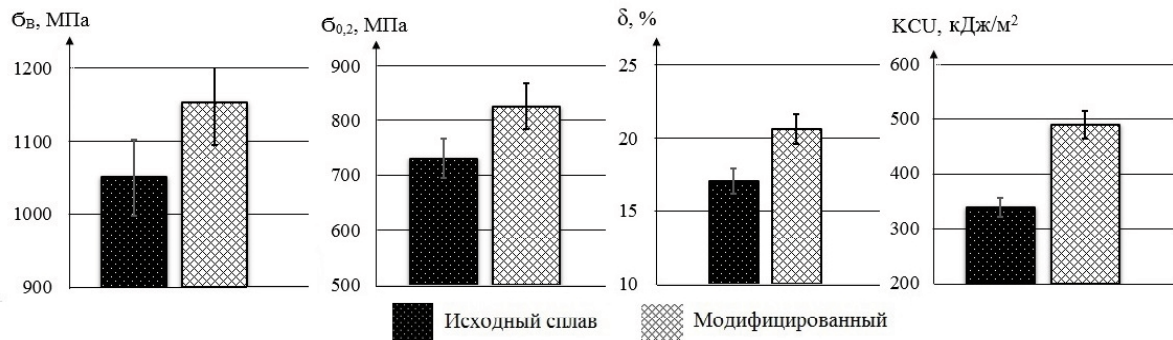


Рис. 3. Механические свойства никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ до и после модифицирования

Для подтверждения эффективности действия $Ti(CN)$ как наномодификатора проведен энергодисперсионный анализ образцов сплава ЖСЗДК-ВИ. 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 $Ti(C,N)$.

Микрорентгеноспектральным анализом доказана эффективность модифицирования нанодисперсными композициями.

Основной эксплуатационной характеристикой никелевых сплавов является жаропрочность. Были проведены стендовые испытания на долговечность при температуре $900\text{ }^{\circ}C$. Модифицированные образцы выдерживали до разрушения большее количество часов, чем немодифицированные образцы. При статической нагрузке в 410 МПа , модифицированные образцы выдерживали в среднем 124 часа, в то время как исходные – в среднем 95 часов, т.е. долговечность возросла на 30% . В зависимости от напряжения при испытаниях, долговечность повысилась от 6 до 30% (рис. 4).

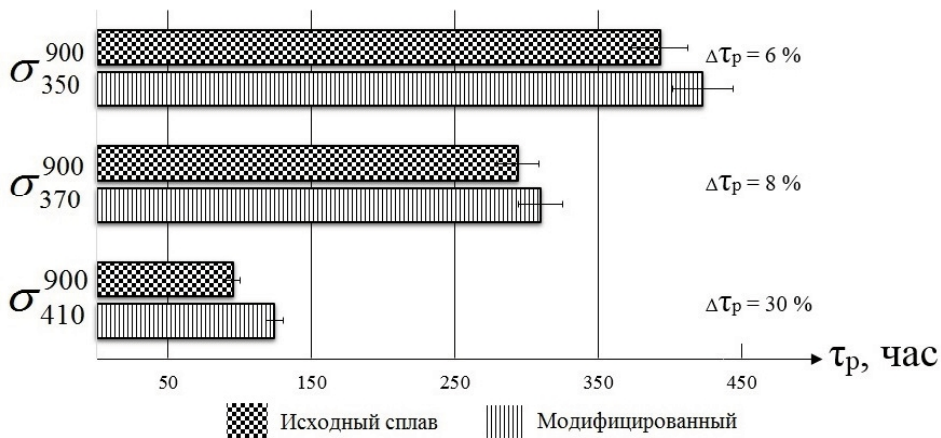


Рис. 4. Долговечность сплава ЖСЗДК-ВИ до и после наномодифицирования

О жаростойкости сплава судили по результатам испытаний на высокотемпературную коррозию, ГОСТ 6130-71. После каждой термоэкспозиции измеряли глубину коррозии. Установлено, что во всех образцах имело место внутреннее окисление. Более интенсивное высокотемпературное окисление наблюдали в немодифицированном образце глубиной $\sim 40\text{ мкм}$ по сравнению с модифицированным образцом, где глубина коррозии составила 30 мкм . Таким образом, достигнуто снижение коррозионного повреждения на 10 мкм или 25% .

Выводы

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

2. В результате введения в расплав наночастиц карбонитрида титана достигнуто значительное измельчение макроструктуры лопаток авиационных ГТД. В немодифицированном сплаве размер зерна составлял $3\text{...}10\text{ мкм}$, в модифицированном – $0,5\text{...}1\text{ мкм}$. Размер частиц

упрочняющих фаз снижается с 5...14 мкм до 1...3 мкм. Таким образом, измельчение зерна сплава ЖСЗДК-ВИ составило от 6 до 10 раз, частиц упрочняющих фаз – от 4 до 5 раз.

3. Изучено распределение легирующих элементов в никелевом сплаве до и после модифицирования методом энергодисперсионного анализа. Сравнительный анализ полученных данных показал наличие в модифицированном образце всплеска интенсивностей Ti, C и N, что подтверждает модифицирующий эффект.

4. Формирование при модифицировании более развитой зернограницной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава ЖСЗДК-ВИ. Достигнуто повышение предела прочности σ_B на 8...10 %; предела текучести $\sigma_{0,2}$ – на 10...13 %; относительного удлинения в 1,1...1,3 раза; ударной вязкости KCU на 40...44 %.

5. Достигнуто повышение эксплуатационных свойств. Долговечность сплава, в зависимости от напряжения испытаний, повышена на 6...30%. После испытаний на жаростойкость, глубину коррозии в модифицированном сплаве удалось уменьшить в среднем на 10 мкм или на 25%.

Литература

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей/ Е.Н. Каблов.— М.: МИСИС, 2001. — 631 с.

2. 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.

3. Патент України на корисну модель № 82163, МПК С22С 19/03. Комплексний наномодифікатор нікелевих сплавів / Н.Є. Калініна, А.Є. Калиновська, В.Т. Калінін, З.В. Віліщук, Т.В. Носова. — № u 2013 00612 Заявл. 17.01.2013; Опубл. 25.07.2013// Бюл. № 14.

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

Поступила в редакцию 14.06.2014

Н.Є. Калініна, А.Є. Юхименко, В.Т. Калінін. Комплексне модифікування складнолегованих жароміцних сплавів

В результаті проведених досліджень по модифікуванню багатоконпонентного нікелевого сплаву ЖСЗДК-В для лопаток газотурбінних двигунів встановлено, що введення комплексного модифікатора на основі нанопорошку карбонітрида титану в розплав призводить до істотної зміни мікроструктури сплаву. Наночастки карбонітрида титану є додатковими центрами кристалізації. Формування при модифікуванні мілкозерної структури і зміцненого твердого розчину призводить до підвищення механічних та експлуатаційних властивостей сплаву, що має важливе практичне значення.

Ключові слова: модифікування, нікелевий сплав, наноконпозиції, мікроструктура, механічні та експлуатаційні властивості.

N.E. Kalinina, A.E. Yukhymenko, V.T. Kalinin. An integrated modification of difficultdoped heat resistance of alloys

The studies on the modification of multicomponent nickel alloy ZhS3DK-VI for gas turbine engine blades found that the introduction of complex modifier based nanopowder titanium carbonitride in the melt leads to a substantial change in the microstructure of the alloy. Nanoparticles of titanium carbonitride are additional crystallization centers. Formation of the modification finegrained structure and solid solution hardening increases the mechanical and performance properties of the alloy, which is of practical importance.

Keywords: modification, a nickel alloy, nanocomposite, microstructure, mechanical and performance properties.