

Н.Е. Калинина, д-р техн. наук, профессор, А.Е. Калиновская, аспирант (Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара) В.Т. Калинин, д-р техн. наук, профессор, (Национальная металлургическая академия Украины), г. Днепропетровск, Украина

Технологические особенности наномодифицирования литейных жаропрочных никелевых сплавов

Приведены результаты экспериментов по наномодифицированию жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК для лопаток газотурбинных двигателей. Проанализирована существующая технология модифицирования. Разработана эффективная технология наномодифицирования никелевых сплавов тугоплавкими композициями на основе титана. Достигнуто значительное измельчение зерна и повышение характеристик прочностных свойств модифицированного сплава.

Ключевые слова: наномодификатор, никелевый сплав, прочность, пластичность, зерно.

Приведені результати експериментів з наномодифікування жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК для лопаток газотурбінних двигунів. Проаналізована існуюча технологія модифікування. Розроблена ефективна технологія наномодифікування нікелевих сплавів тугоплавкими композиціями на основі титану. Досягнуто значне подрібнення зерна і підвищення характеристик міцносних властивостей модифікованого сплаву.

Ключові слова: наномодифікатор, нікелевий сплав, міцність, пластичність, зерно.

Performed experiments on nanomodification of heat-resistant nickel alloy ZHS3DK for blades of gas turbine engines. Review current technology nanomodification. An effective technique of modifying nickel alloy refractory compositions based on titanium. A substantial grain refinement and increased performance of the strength properties of the modified alloy.

Keywords: modifier, nickel alloy, hardness, ductility, grain.

Основной тенденцией развития авиадвигателестроения является непрерывное увеличение температуры газов перед турбиной, что обуславливает повышение требований к конструкции, надежности и ресурсу работы лопаток, дисков, валов – деталей, испытывающих высокие термомеханические, циклически изменяющиеся нагрузки.

Возрастающие требования к надежности, несущей способности и ресурсу газотурбинных двигателей (ГТД) летательных аппаратов предопределяют разработку, создание и применение в их производстве качественно новых технологий, обеспечивающих повышение надежности и долговечности наиболее ответственных деталей. К таким деталям относятся в первую очередь лопатки турбины, которые получают литьем никелевого расплава в керамические формы. Такая технология обеспечивает высокую наполняемость формы и получение заданной конфигурации рабочей части лопатки. Однако такой температурно-временной режим объемной кристаллизации

для длинномерных отливок приводит к укрупнению макрозерен до нескольких десятков миллиметров. В работах ВИАМ установлено [1, 2], что с увеличением размера зерна жаропрочных никелевых сплавов резко снижается их предел выносливости, сопротивление удару и пластичность. В связи с этим повышение эксплуатационных характеристик лопаток ГТД находится в прямой зависимости от изменения структурных составляющих никелевых сплавов.

Замена деформируемых сплавов на литейные вызвано более высокой структурной стабильностью последних, а также тем, что в литейных сплавах методом специального литья можно достичь значительного упрочняющего эффекта за счет образования γ и γ' -фазы, многочисленных карбидов и интерметаллидов. Литейные сплавы легче поддаются модифицированию и, обладая развитой гетерофазной структурой, обеспечивают уровень жаропрочности выше, чем деформируемые [3].

Детали турбонасосного агрегата, лопатки ГТД и другие де-

тали ответственного назначения изготавливают методом специального литья жаропрочных никелевых сплавов ХН59МВТКЮЛ (ЖСЗДК), ЖСЗДК-ВИ.

Характерной особенностью никелевых сплавов является высокий уровень структурной и фазовой термостабильности, что определяет надежность работы этих материалов в экстремальных условиях высокотемпературных газовых потоков. Однако трудоемкость изготовления и повышение требований к качеству лопаток, полученных направленной кристаллизацией, выдвигают альтернативные технологии получения лопаток с повышенным уровнем жаропрочности, сопротивления усталости, изотропности физико-механических свойств и структурных параметров. Разработка нового поколения авиационных газотурбинных двигателей связана с внедрением прогрессивных технологий получения качественного расплава. В работах [2,4] было установлено, что сплавы интенсивно упрочняются при модифицировании дисперсными порошками тугоплавких

композиций с размерами частиц менее 1 мкм.

Согласно классической теории существует три вида модифицирования [5]:

- измельчение первичных зерен при кристаллизации матричной фазы;
- изменение внутреннего строения зерен-дендритов;
- измельчение эвтектик.

Постановка задачи. Целью данной работы является повышение механических свойств литейного жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК с равноосной структурой для рабочих лопаток ГТД. Рассмотрен первый вид модифицирования за счет измельчения зерен никелевого твердого раствора, что является результатом зародышевого действия тугоплавких частиц модификаторов, специально введенных в расплав [6].

Результаты. Разработка технологии ввода наномодификаторов в расплав включала:

- 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 металла-основы (никеля) с порошком модификатора. Авторами предложен нанодispersный модификатор – карбонитрид титана TiCN, соответствующий ТУ У 24.6-2424050-001-2002. На втором этапе проводили прессование порошков в стальной прессформе. Третьим этапом являлось введение порошка в жидкий расплав жаропрочного никелевого сплава.

Атриторную обработку смесей порошков проводили в три этапа. На первом происходило расплющивание и разлом 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.

Прессование производили на гидравлическом прессе в стальных прессформах с усилием 3 тонны на 1 брикет. Ввод в расплав спрессованных таблеток порошка осуществляли методом закрепления их к термопаре во время плавки в печи УППФЗМ.

При проведении эксперимента наиболее предпочтительным оказался метод смачивания никелем и его расплавами большинства тугоплавких соединений. Именно карбиды, нитриды и карбонитриды наиболее склонны образовывать в жидком расплаве взвеси, которые обладают определенной устойчивостью. Наилучшими наномодификаторами для обработки никелевых сплавов, имеющих гранецентрированную кубическую решетку, являются тугоплавкие композиции на основе титана с размером частиц 10...100 нм.

Состав спрессованных таблеток: нанопорошок TiCN размером 50...100 нм; порошок Ti размером 20 мкм; порошок Al размером 40 мкм; Al-пудра.

Брикет, попадая в расплав, растворяется в нем и равномерно распределяется по объему расплава путем механического перемешивания термопарой.

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.

Для рабочих лопаток турбины, отливаемых из сплава ЖСЗДК, большое значение имеют высокие

характеристики пластичности, длительной прочности и ударной вязкости. Как правило, в связи с особенностью кристаллизации эти лопатки имеют довольно крупнозернистую неоднородную структуру. В силу бокового теплоотвода на кромках образуются крупные столбчатые кристаллы, что приводит к образованию технологических и эксплуатационных трещин по кромкам. При неблагоприятном расположении кристаллов может также снижаться конструкционная прочность лопаток.

С целью оптимизации макроструктуры, получения равномерной полиэдрической, мелкокристаллической структуры на лопатках было опробовано модифицирование сплава ЖСЗДК нанодispersными порошками TiCN в таблетированном виде. Исследовали различную дозировку наномодификатора: 0,1 и 0,2% мас. из учета 50%-ного усвоения расплавом.

Нанокomпозиции на основе титана получены на установке плазмохимического синтеза. Получение нанопорошков плазмохимическим синтезом, происходящее при высоких скоростях объемной конденсации газопламенного потока приводит к нестабильному состоянию дисперсных частиц. При размерах частиц менее 10...20 нм появляются области аморфных образований. Кроме того, нанопорошки на титановой основе являются хорошими геттерами – материалами с развитой свободной поверхностью, способной к химической адсорбции. Они склонны к агрегатированию и окислению. Быстрое окисление нанопорошков затрудняет их использование в качестве модификаторов. Поэтому преобладающая роль в процессе получения нанодispersных композиций – модификаторов отводится сохранению чистой поверхности с большой адсорбционной активностью. Исходя из этих предпосылок, разработан и запатентован способ плакирования нанодispersных модификаторов [7].

Оптимальную температуру модифицирования определяли исходя из диаграммы состояния Ni-Cr и Ti-Ni (рис. 1). При температуре расплавления 1630°C, температура модифицирования составляла 1580°C, выдержка 1,5...2 мин. За-

ливку расплава в нагретые керамические формы проводили при температуре 1630°C.

Определение химического состава отлитых образцов показало, что наномодифицированные образцы имели завышенное содержание титана – 3,4% мас. по сравнению с исходным содержанием в сплаве – 3,0% мас. (табл. 1), что доказывает хорошую усвояемость вводимого наномодификатора расплавом.

Для подтверждения эффективности проведенного наномодифицирования были изучены структура и показатели механических свойств исследуемого сплава. Макроструктура немодифицированных образцов крайне неоднородна (рис. 2), размер зерна составлял от 5 до 8 мм. Модифицированные образцы имели однородную структуру со средним размером зерна до 1 мм, т.е. измельчились в 5-8 раз. Механические свойства сплава ЖСЗДК определяли на образцах-свидетелях после термоупрочняющей обработки: закалка от 1250°C и последующее старение. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Как показывают данные табл. 2, лучшие результаты показали образцы, отлитые с наномодифицированием. Показатели свойств превышают требования ОСТ по характеристикам прочности и ударной вязкости. Характеристики прочности повысились на 9,3 %, ударной вязкости – на 34,8 %.

Результаты механических испытаний доказывают эффективность предложенной технологии наномодифицирования.

Выводы

Наномодифицирование никелевого сплава ЖСЗДК для лопаток ГТД оптимизированным составом комплексного наномодификатора, включающего нанопорошки карбонитрида титана, титана и дисперсные порошки алюминия, измельчает зерно сплава в 5...8 раз и повышает предел его прочности – на 9,3 %, а ударной вязкости – на 34,8%.

Список литературы:

1. Глезер, Г.М. Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков [Текст]: сб. науч. тр. / Г.М. Глезер, Е.Б. Качанов, С.Т. Кишкин. – М.: ВИАМ, 1994. – С. 244-252.

2. Каблов, Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей [Текст] / Е.Н. Каблов. – М.: МИСИС, 2001. – 631 с.

3. Богуслаев, В.О. Авіаційно-космічні матеріали та технології [Текст] / В.О. Богуслаев, О.Я. Качан, Н.Є. Калініна. – Запоріжжя, 2009. – 383 с.

4. Наноматериалы и нанотехнологии: получение, строение, применение. Монография / Н.Е. Калинина, В.Т. Калинин, З.В. Вилищук,

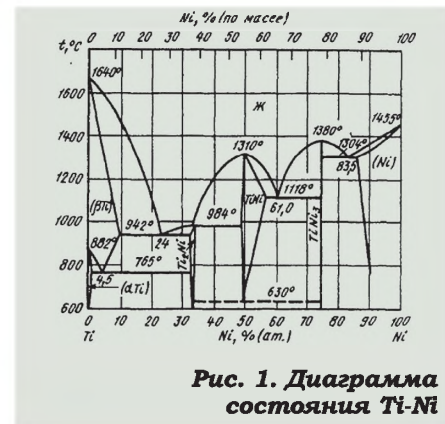


Рис. 1. Диаграмма состояния Ti-Ni

Таблица 1. Химический состав жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК до и после модифицирования

Состояние сплава	Содержание элементов, % мас.								
	Al	Ti	Cr	Mo	W	Co	Fe	Mn, Si	Ni
немодифицированный	4,4	3,0	11,8	4,2	4,0	9,0	0,8	< 0,4	Основа
модифицированный	4,4	3,4	11,6	4,1	4,0	8,9	0,8	< 0,4	

Таблица 2. Механические свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК до и после модифицирования

Состояние сплава	Механические свойства при 20°C			
	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²
немодифицированный	1050	17,0	24,8	32,5
модифицированный	1148	20,6	23,4	43,8
ОСТ 1.90.126-85	≥ 931	≥ 7,0	-	≥ 30,0

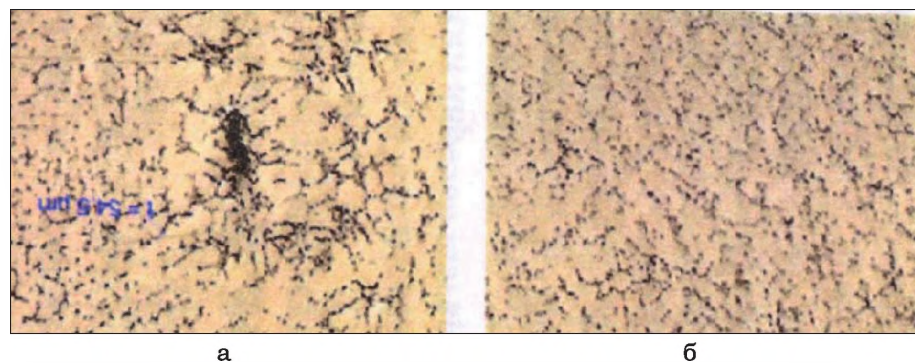


Рис. 2. Распределение карбидной фазы до (а) и после наномодифицирования (б), х50

А.В. Калинин, О.А. Кавац, Дн-ск: 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. Сабуров, В.П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов

[Текст] / В.П. Сабуров. – Литейное производство, 1988. – №9. – С. 34-41.

7. Патент РФ 2069702, МКИ6С21С 1/00. Модификатор / Калинин В.Т., Шатов В.В., Комляков В.И. - № 93030977; Заявл. 01.03.93. Опул. 27.11.96. Бюл. № 33. – 8 с.