

УДК 699.245:629.7.03

**Н. Е. КАЛИНИНА<sup>1</sup>, А. Е. ЮХИМЕНКО<sup>1</sup>, А. В. КАЛИНИН<sup>2</sup>,  
Д. Р. ПАВЛОВ<sup>1</sup>, М. В. ГРЕКОВА<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, Украина*<sup>2</sup> *Днепропетровский университет экономики им. А. Нобеля*

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

*С целью повышения показателей механических свойств жаропрочных никелевых сплавов, применяемых для деталей ответственного назначения, провели эксперименты по дисперсному модифицированию. Обоснован выбор модификатора для исследуемого сплава; рассмотрена технология получения модификатора. Определено оптимальное количество вводимого модификатора в расплав, а также оптимальную температуру модифицирования. Предложенная технология позволила измельчить зерно сплава ХН70ВМЮТ и повысить механические свойства, а именно: предел прочности, предел текучести и ударную вязкость.*

**Ключевые слова:** жаропрочный сплав, нанопорошок, модификатор, макроструктура, механические свойства.

### Введение

Основной тенденцией развития авиадвигателестроения является непрерывное увеличение температуры топливных газов перед турбиной, что обуславливает повышение требований к конструкции, надежности и ресурсу работы рабочих 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 [1]. 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 зерен до нескольких десятков миллиметров. Установлено [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 жаропрочных деформируемых сплавов

на литейные вызвано их более высокой структурной стабильностью, а также тем, что в литейных сплавах методом специального литья можно достичь значительного упрочняющего эффекта за счет образования матричной  $\gamma$  и  $\gamma'$ -фазы, многочисленных карбидов и интерметаллидов. Литейные сплавы легче поддаются модифицированию и, обладая развитой гетерофазной структурой, обеспечивают уровень жаропрочности выше, чем деформируемые.

Детали турбонасосного агрегата, лопатки ГТД и другие детали ответственного назначения изготавливают методом специального литья жаропрочного никелевого сплава ХН70ВМЮТ. 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 рабочих лопаток, полученных направленной кристаллизацией, выдвигают альтернативные технологии получения лопаток с повышенным уровнем жаропрочности, сопротивления усталости, изотропности физико-механических свойств и структурных параметров [3]. Разработка нового поколения авиационных газотурбинных двигателей связана с внедрением прогрессивных технологий получения качественного расплава. Было установлено [4], что многокомпонентные жаропрочные хромоникелевые 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.

Целью данной работы является повышение механических свойств литейного жаропрочного никелевого сплава ХН70ВМЮТ с равноосной структурой для рабочих лопаток ГТД.

Разработка технологии ввода дисперсных модификаторов в расплав включала:

- оптимизацию состава комплексного модификатора;
- определение способа ввода модификатора в расплав.

Для ввода порошков модификатора в расплав разработана технология, состоящая из трех этапов. На первом этапе методом порошковой металлургии смешивали порошки никеля с порошком модификатора. Предложен нанодисперсный модификатор на основе карбонитрида титана Ti(CN) с размерами частиц до 100 нм. На втором этапе проводили прессование порошков в стальной пресс-форме. Третьим этапом являлось введение порошка в жидкий расплав жаропрочного никелевого сплава.

Смешивание порошков проводили следующим образом. Сначала проводили расплющивание и размол отдельных частиц; затем – разрушение структуры частиц за счет холодного сваривания разнородных частиц и образования слоистой структуры; последним этапом являлось истончение компонентов слоев и повышение внутренней однородности частиц. Теоретической основой такой 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 порошков, находящихся в рабочей камере. Непосредственно мешалкой приводится во вращение относительно небольшое количество порошков, остальные приводятся в движение путем эстафетной передачи импульсов от порошка к порошку.

Прессование производили на гидравлическом прессе в стальных пресс-формах с усилием 3 тонны на 1 брикет. Ввод в расплав спрессованных брикетов порошка осуществляли методом закрепления их к термопаре погружения.

При проведении эксперимента наиболее предпочтительным оказался метод смачивания никелем и его расплавами большинства тугоплавких соединений. Карбиды, нитриды и карбонитриды наиболее склонны образовывать в жидком расплаве взвеси, которые обладают определенной устойчивостью [1].

Наилучшими наномодификаторами для обработки никелевых сплавов, имеющих гранцентрированную кубическую решетку, являются тугоплавкие композиции на основе титана с размером частиц до 100 нм.

Брикет модификатора, попадая в расплав, растворяется и равномерно распределяется по объему расплава путем механического перемешивания. Исследовали различную дозировку наномодификатора: от 0,1 до 0,2 % масс из учета 50%-ного усвоения расплавом.

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 технологический эффект, т.е. в конце плавки.

В связи с особенностью кристаллизации, рабочие лопатки ГТД 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 ХН70ВМЮТ нанодисперсными порошками Ti(CN) в брикетированном виде.

Наноконпозиции на основе титана получены на установке плазмохимического синтеза [6]. 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 в использовании в качестве модификаторов. Поэтому преобладающая роль в процессе получения нанодисперсных композиций-модификаторов отводится сохранению чистой поверхности с большой адсорбционной активностью.

Оптимальную температуру модифицирования определяли исходя из диаграммы состояния Ni-Cr и Ni-Ti. При температуре расплавления 1630°C температура модифицирования составляла 1580°C, вы-

держка составляла 5 мин. Затем проводили заливку расплава в нагретые керамические формы.

Определение химического состава отлитых образцов показало, что наномодифицированные образцы имели завышенное содержание титана по сравнению с исходным содержанием в сплаве (табл. 1), что доказывает хорошую усвояемость вводимого модификатора расплавом.

Таблица 1  
Химический состав сплава ХН70ВМЮТ, % масс

Содержание элементов					
С	Si	Mn	Cr	Ti	Al
0,1-0,16	0,6	0,5	14,0-16,0	1,0-1,4	1,7-2,2
W	Mo	Fe	S	P	B
4,0-6,0	3,0-5,0	3,9	0,012	0,015	0,01

Модифицированные образцы имели однородную структуру со средним размером зерна до 1 мм, т.е. предельное измельчение зёрен составляло в 5...8 раз. Микроструктура сплава в исходном состоянии представляет собой: избыток карбидов TiC кубической формы и карбидов Cr ( $Cr_{23}C_6$ ) в виде тонких пластин,  $\gamma$ -фаза выделяется в глобулярной форме с размером частичек 0,05-0,08 мкм (рис. 1).

Механические свойства сплава ХН70ВМЮТ определяли на образцах-свидетелях после термоупрочняющей обработки: закалка от 1160°C и последующее старение при 700°C. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Результаты механических испытаний доказывают эффективность предложенной технологии модифицирования.

Таблица 2  
Механические свойства сплава ХН70ВМЮТ

До модифицирования		
$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	КСУ, Дж/м <sup>2</sup>
590	980	0,59
После модифицирования		
$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	КСУ, Дж/м <sup>2</sup>
649	1078	0,8

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 10 %, ударной вязкости - на 35 %.

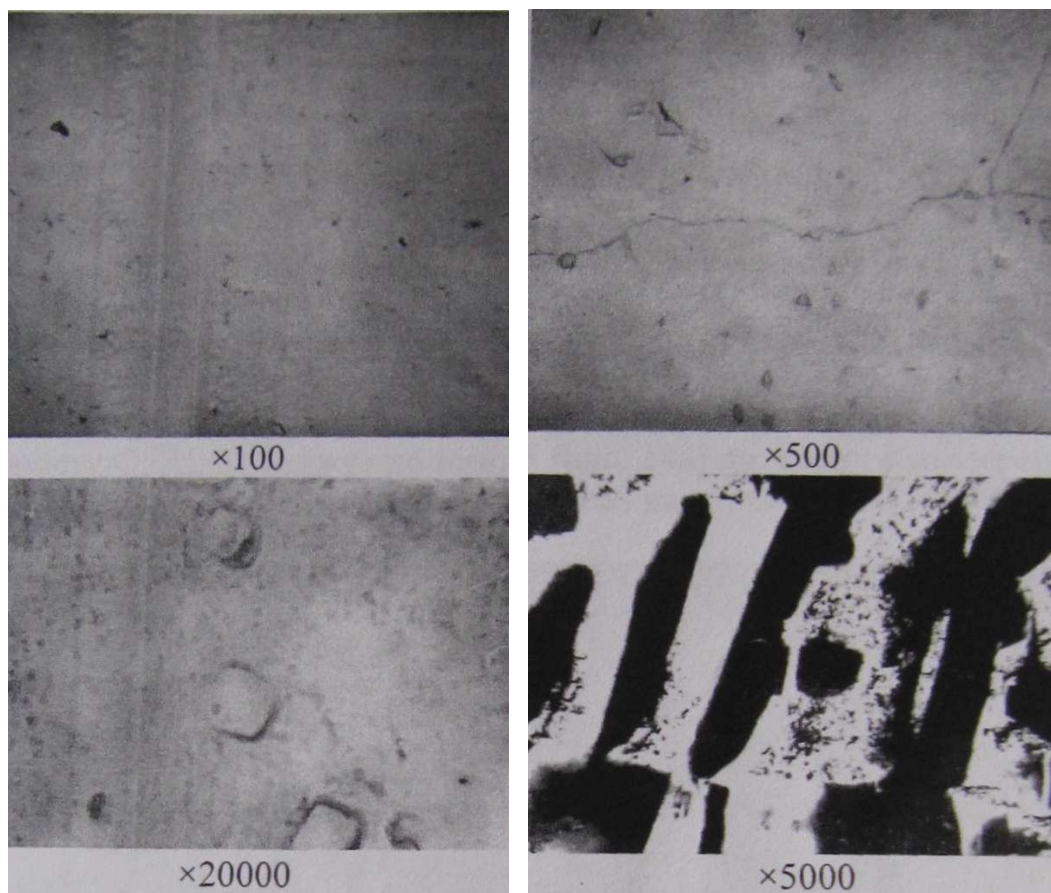


Рис. 1. Микроструктура сплава в исходном состоянии

## Выводы

Дисперсное модифицирование никелевого сплава ХН70ВМЮТ для лопаток ГТД оптимальным составом комплексного модификатора, включающего нанопорошки карбонитрида титана, титана и дисперсные порошки алюминия, позволило измельчить зерно сплава ХН70ВМЮТ в 5...8 раз и повысить предел прочности на 10 %, а ударную вязкость - на 35%, что доказывает эффективность модифицирования.

## Литература

1. Каблов, Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей [Текст] / Е. Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 631 с.
2. Авіаційно-космічні матеріали та технології [Текст] : підручник / В. О. Богуслаєв, О. Я. Качан,

Н. Є. Калініна [и др.]. - Запоріжжя : Мотор Січ, 2009. – 351 с.

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

4. Калинина, Н. Е. Технологические особенности наномодифицирования литейных жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В. Т. Калинин // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 1(31). – С. 54-56.

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. – 8 с.

Поступила в редакцию 26.05.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии производства Т. А. Манько, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск.

## ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

*Н. Є. Калініна, А. Є. Юхименко, В. Т. Калінін, Д. Р. Павлов, М. В. Грекова*

З метою підвищення показників механічних властивостей жароміцних нікелевих сплавів, застосовуваних для деталей відповідального призначення, проведено експерименти по дисперсному модифікуванню. Обґрунтовано вибір модифікатора для досліджуваного сплаву; розглянута технологія отримання модифікатора. Визначено оптимальну кількість введенного модифікатора в розплав, а також оптимальну температуру модифікування. Запропонована технологія дозволила подрібнити зерно сплаву ХН70ВМЮТ і підвищити механічні властивості, а саме: межу міцності, межу плинності і ударну в'язкість.

**Ключові слова:** жароміцний сплав, нанопорошок, модифікатор, макроструктура, механічні властивості.

## INFLUENCE OF MODIFICATION ON MECHANICAL PROPERTIES SUPERALLOYS

*N. E. Kalinina, A. E. Yukhymenko, V. T. Kalinin, D. R. Pavlov, M. V. Grekova*

In order to improve mechanical properties of heat-resistant nickel alloys used for parts for critical applications, we conducted experiments to disperse modification. The choice of modifier investigated for the alloy; the technology of producing the modifier. The optimal amount of modifier is introduced into the melt, as well as modification of the optimum temperature. The proposed technology has milled grain HN70VMYUT alloy and improve the mechanical properties such as tensile strength, yield strength and toughness.

**Key words:** superalloy, nanopowder, modifier, macrostructure, mechanical properties.

**Калинина Наталия Евграфовна** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии производства, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: kalinina-ne@yandex.ru.

**Юхименко Анастасия Евгеньевна** – канд. техн. наук, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: yuane@ukr.net.

**Калинин Александр Васильевич** – канд. техн. наук, доц., Днепропетровский университет экономики им. А. Нобеля, Днепропетровск, Украина, e-mail: vt.kalinin@gmail.com.

**Павлов Дмитрий Романович** – студент, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина.

**Грекова Марина Витальевна** – студент, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина.