

<https://doi.org/10.15407/knit2019.03.025>

УДК 669.715

М. В. Грекова¹, А. В. Калинин², Е. А. Джур³, Т. В. Носова³

¹ Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепро, Украина

² Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепро, Украина

³ Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепро, Украина

КОМПЛЕКСНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ

Цель работы — разработка технологии комплексного модифицирования многокомпонентных сплавов системы Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co дисперсными композициями. Основой модификатора служил нанодисперсный модификатор — карбонитрид титана Ti(C,N). Нанопорошки модификатора получены на установке плазмохимического синтеза. Научной новизной работы является установление механизма действия модификатора в расплаве. Экспериментальным путем установлено оптимальное количество вводимого модификатора. Определены температурно-временные параметры модифицирования. Установлены закономерности влияния модифицирования дисперсной тугоплавкой композицией карбонитрида титана на повышение комплекса свойств многокомпонентного никелевого сплава. Полученные результаты использованы на машиностроительном предприятии для повышения механических и эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов для лопаток газотурбинного двигателя. В результате проведенных исследований по модифицированию многокомпонентных никелевых сплавов ЖСЗДК, ЖС6У для лопаток газотурбинных двигателей установлено, что введение комплексного модификатора на основе нанопорошка карбонитрида титана в расплав приводит к существенному изменению структуры сплавов. 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. Достигнуто значительное повышение прочностных и пластических свойств: σ_{θ} повышено на 10 %, σ_T — на 13 %, δ — на 10...30 %, КСЧ — на 44 %. Долговечность сплава, в зависимости от напряжения испытаний, повышена до 30 %. После испытаний на жаростойкость глубина коррозии в модифицированных сплавах уменьшена в среднем на 25 %, что подтверждает эффект модифицирования.

Ключевые слова: никелевые сплавы, наноконпозиции, структура, механические и эксплуатационные свойства, модифицирование.

ВВЕДЕНИЕ

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 эф-

фективность 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 [1].

Условия работы лопаток в ГТД нового поколения становятся все более напряженными в связи с повышением температуры газа на входе в турбину, ресурса и цикличности работы двигателя. Эти экстремальные условия требуют примене-

© М. В. ГРЕКОВА, А. В. КАЛИНИН, Е. А. ДЖУР, Т. В. НОСОВА, 2019

ния перспективных материалов с улучшенной структурой и свойствами.

Эффективным способом измельчения структурных составляющих сплавов является модифицирование многокомпонентных сплавов нанодисперсными композициями [2, 3].

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 сплавах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом исследования служили жаропрочные никелевые сплавы ЖСЗДК, ЖС6У, применяемые для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя (таблица).

Металлографическим методом исследована макро- и микроструктура образцов, вырезанных из лопаток, до и после модифицирования.

Для определения жаропрочности сплавов образцы были подвержены испытаниям на высокотемпературную коррозию, а также стендовым испытаниям на долговечность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведены опытно-промышленные плавки сплавов ЖСЗДК, ЖС6У в исходном состоянии и с модификатором.

Разработана технология ввода модификатора в расплав, включающая: оптимизацию состава комплексного наномодификатора; определение способа ввода модификатора в расплав; установление температурно-временного режима плавки.

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 [2, 4].

Теоретической основой атриторной обработки является представление о системе шары-порошок как многокомпонентной вязкой жидкости, интенсивность перемещения компонентов которой определяется турбулентной диффузией.

С целью оптимизации макроструктуры, получения равномерной полиэдрической, мелкокристаллической структуры на лопатках было опробовано модифицирование сплавов ЖСЗДК, ЖС6У нанодисперсными композициями в таблетированном виде.

Основой модификатора служил нанодисперсный модификатор — карбонитрид титана Ti(C,N). Состав спрессованных таблеток: нанопорошок Ti(C,N) и Ti размером 50...100 нм; порошок Ni размером 20...40 мкм; Al-пудра [4]. Нанопорошки получены на установке плазмохимического синтеза.

Экспериментальным путем установлено оптимальное количество вводимого модификатора: 0.15...0.20 % от массы расплава. Опробованы температурно-временные параметры модифицирования: температура расплава 1600 ± 10 °С; время действия модификатора 3...5 мин при механическом перемешивании.

Структура многокомпонентных никелевых сплавов ЖСЗДК, ЖС6У — гетерофазная, пред-

Химический состав исследуемых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, % мас.								
	Al	Ti	Cr	Mo	W	Co	C	Mn, Si	Ni
ЖС6У	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.
ЖСЗДК	4.0...4.8	2.5...3.2	11.0...12.5	3.8...4.5	3.8...4.0	8.0...10.0	0.10...0.15	≤0.4	Осн.

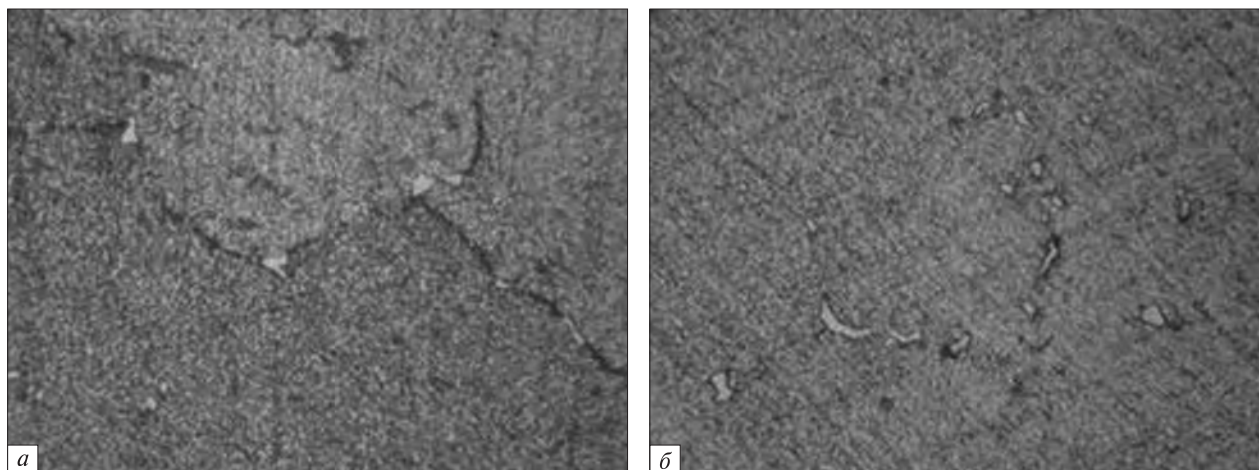


Рис. 1. Микроструктура исходного сплава ЖСЗДК: *а* — очаги разрушения на стыке зерен, *б* — включения различной морфологии

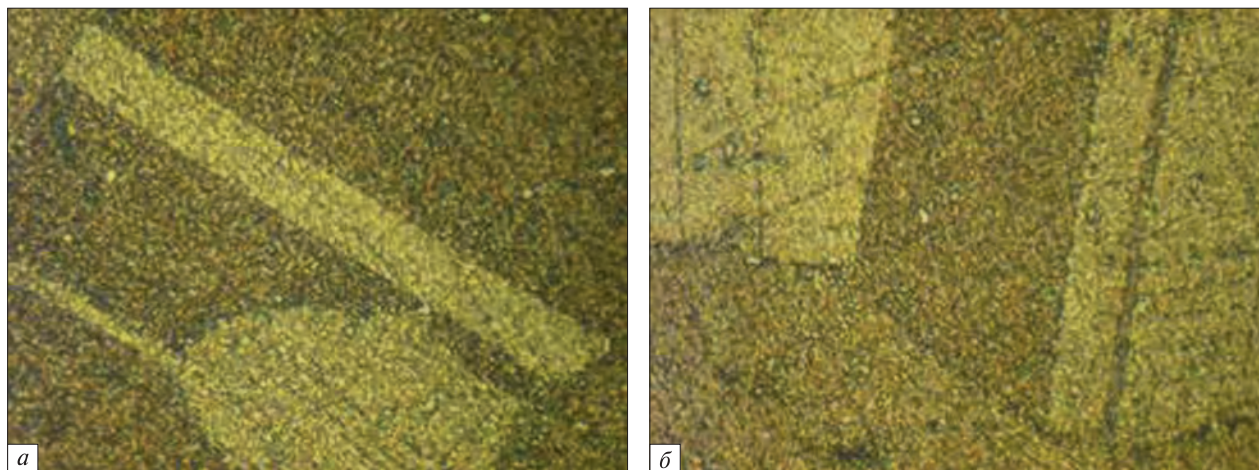


Рис. 2. Микроструктура немодифицированного сплава ЖСЗДК: *а* — двойниковые образования в структуре, *б* — пилообразная граница зерен γ -твердого раствора (увеличение на рис. 1 и 2 — порядка 1000)

ставляющая собой высокодисперсные частицы γ -фазы, равномерно рассеянные в матрице из твердого раствора легирующих элементов в никеле. Все тугоплавкие легирующие элементы (Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W, Re) увеличивают область существования γ -фазы [5].

Научной новизной работы является установление механизма действия модификатора в расплаве. Основным механизмом является твердорастворное упрочнение. Вследствие обеднения γ -фазы тугоплавкими элементами эффективность твердорастворного упрочнения уменьшается и снижается сопротивление скольжению дислокаций, что приводит к понижению жаро-

прочности. Алюминий и титан являются γ -образующими, входят в γ -твердый раствор и являются основными упрочнителями. Таким образом, упрочнение сложнолегированного сплава ЖСЗДК происходит за счет: упрочнения γ -твердого раствора, наличия дисперсных фаз, увеличения количества γ -фазы, уменьшения скорости укрупнения γ -фазы при рабочих температурах.

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

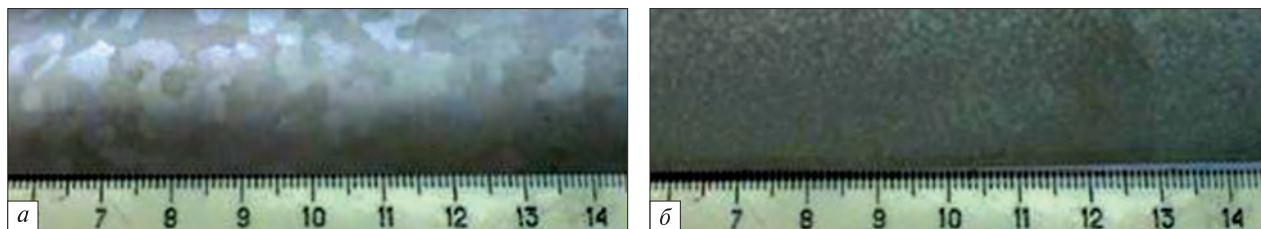


Рис. 3. Макроструктура лопаток: *а* — немодифицированный сплав, *б* — модифицированный

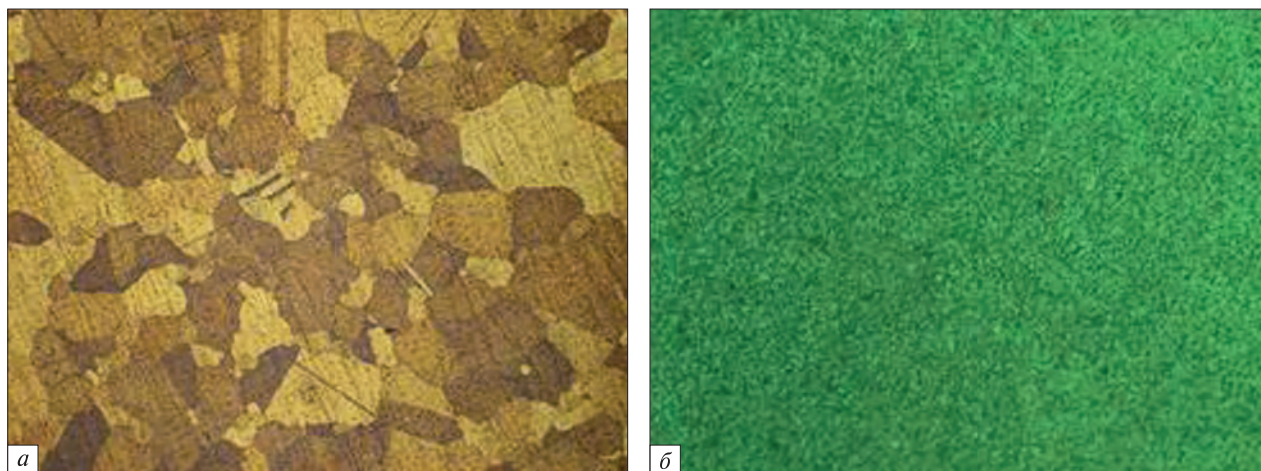


Рис. 4. Структура модифицированного сплава ЖСЗДК: *а* — макроструктура до модифицирования, *б* — микроструктура после модифицирования (увеличение — порядка 50 и 500 соответственно)

туры сплава в исходном состоянии показало, что структура сплава крайне неоднородна по сечению. Обнаружены крупные включения на стыке границ зерен. Такие включения могут служить концентраторами напряжений и очагами развития трещин при эксплуатации (рис. 1, *а*).

Изучение морфологии включений при увеличении порядка 1000 (рис. 1, *б*) показало наличие включений различных форм от многогранников до пластин. Пластинчатые включения были длиной 6...14 мкм; включения квадратной формы — со стороной 4...6 мкм.

На поверхности образца выявлены крупные дендриты с грубыми линиями скольжения (рис. 2, *а*); образуются крупные, вытянутые зерна, сориентированные перпендикулярно к поверхностному слою. Такая макроструктура может провоцировать образование как технологических горячих трещин, так и эксплуатационных. С диаметрально противоположной стороны — дендритная струк-

тура значительно дисперснее, дендриты имеют большую разветвленность и упорядоченность расположения (рис. 3, *б*).

Преимущество более мелкого зерна в литых никелевых сплавах связано, по-видимому, со способностью мелкозернистого материала распределять напряжения среди большего числа границ, что приводит к пониженному уровню деформации на каждой границе. В модифицированных образцах зерна имели полиэдрическую форму, величина их практически одинакова по сечению шлифа. На рис. 4, *а* представлена макроструктура никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ, обработанного модифицирующим комплексом на основе нанодисперсного карбонитрида титана.

Основными фазами в образцах сплава ЖСЗДК были: γ -фаза — твердый раствор на основе никеля; интерметаллидная γ -фаза на основе $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$; эвтектическая фаза (γ - γ'); карбиды MeC и Me_{23}C_6 ; карбонитриды $\text{Me}(\text{C}, \text{N})$. При из-

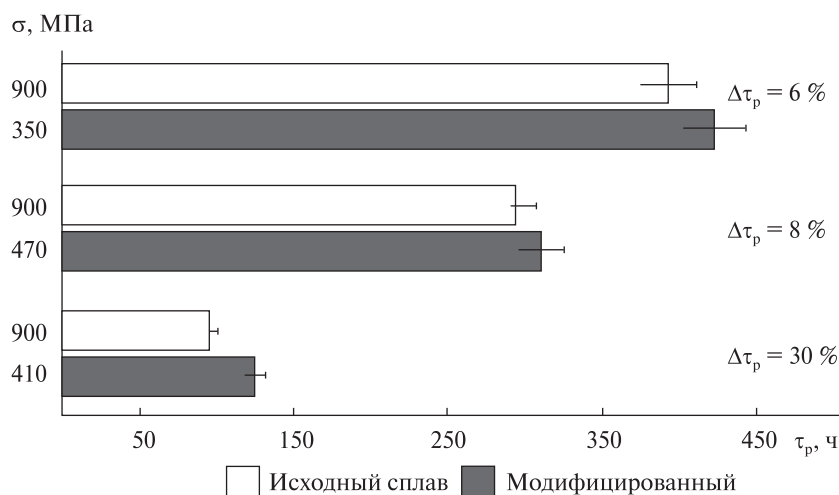


Рис. 5. Долговечность сплава ЖС6У до и после модифицирования

учении микроструктуры модифицированного сплава было установлено, что все включения (карбиды, интерметаллиды, карбонитриды), имеющиеся в сплаве, равномерно распределены по всему объему образца, не образуя скоплений и групп. Все включения были практически одного размера 1...5 мкм (рис. 4, б).

Формирование при модифицировании упрочненного никелевого твердого раствора и более развитой зернограничной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава ЖСЗДК (предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и ударной вязкости) по сравнению с немодифицированным состоянием. Достигнуто значительное повышение прочностных и пластических свойств: σ_B повышено на 10 %, σ_T — на 13 %, δ — на 10...30 %, КСЧ — на 44 %.

Основной эксплуатационной характеристикой никелевых сплавов является жаропрочность. Были проведены стендовые испытания на долговечность при температуре 900 °С. Модифицированные образцы выдерживали до разрушения большее количество часов, чем немодифицированные образцы. При статической нагрузке в 400 МПа модифицированные образцы выдерживали в среднем 120 ч, в то время как исходные — в среднем 90 ч, т. е. долговечность возросла на 30 %. В зависимости от напряжения при испыта-

ниях, долговечность повысилась от 6 до 30 % (рис. 5).

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 немодифицированных образцах глубиной около 40 мкм по сравнению с модифицированными образцами, где глубина коррозии составила до 30 мкм. Таким образом, достигнуто снижение коррозионного повреждения на 10 мкм, т. е. на 25 %.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что комплексное модифицирование жаропрочных никелевых сплавов ЖСЗДК, ЖС6У влияет на формирование мелкодисперсной структуры с равномерным распределением легирующих элементов. В результате введения в расплав наночастиц карбонитрида титана достигнуто значительное измельчение макроструктуры лопаток авиационных ГТД.

2. Формирование при модифицировании более развитой зернограничной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава ЖСЗДК. Достигнуто зна-

чительное повышение прочностных и пластических свойств: σ_B повышено на 10 %, σ_T — на 13 %, δ — на 10...30 %, КСЧ — на 44 %.

3. Достигнуто повышение эксплуатационных свойств. Долговечность сплава, в зависимости от напряжения испытаний, повысилась на 30 %. После испытаний на жаростойкость глубина коррозии в модифицированных сплавах уменьшилась в среднем на 25 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайдук С. В., Кононов В. В., Куренкова В. В. Расчет фазового состава литейного жаропрочного никелевого сплава методом CALPHAD. *Современная электрометаллургия*. 2015. № 3 (120). С. 35—40.
2. Каблов Е. Н. *Литые лопатки газотурбинных двигателей*. Москва: МИСИС, 2001. 631 с.
3. Калинина Н. Е., Калиновская А. Е., Калинин В. Т. Технологические особенности наномодифицирования литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2013. № 1(31). С. 54—56.
4. *Пат. України на корисну модель № 82163*, МПК С22С 19/03. Калініна Н. Є., Калиновська А. Є., Калінін В. Т., Віліщук З. В., Носова Т. В. Комплексний наномодифікатор нікелевих сплавів.
5. Dzhur Y., Kalinin A., Grekova M., Guchenkov M. Investigation of the influence of nanodispersed compositions obtained by plasmochemical synthesis on the crystallization processes of structural alloys. *EUREKA: Phys. and Engineering*. 2017. 6. P. 56—61.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018

REFERENCE

1. Gaiduk S. V., Kononov V. V., Kurenkova V. V. (2015). Calculation of phase composition of castable high-temperature corrosion-resistant nickel alloy by using CALPHAD method. *Advances in electrometallurgy*, No. 3 (120), 35—40.
2. Kablov E. N. (2001). *Lytye lopatky hazoturbynykh dvyhatelye (splavy, tekhnolohyya, pokrytyya)*. Moscow: MYSYS [in Russian].
3. Kalinina N. E., Kalinovskaya A. E., Kalinin V. T. (2013). Tekhnologicheskie osobennosti nanomodifitsirovaniya liteinykh zharoprochnykh nikelovykh splavov. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*, No. 1 (31), 54—56 [in Russian].
4. *Patent of Ukraine No. 82163*. Kalynyna N. E., et al. Kompleksnyy nanomodifikator nikelovykh splaviv [in Ukrainian].
5. Dzhur Y., Kalinin A., Grekova M., Guchenkov M. (2017). Investigation of the influence of nanodispersed

compositions obtained by plasmochemical synthesis on the crystallization processes of structural alloys. *EUREKA: Phys. and Eng.*, 6, 56—61.

Received 18.06.2018

М. В. Грекова¹, А. В. Калинин²,
Е. О. Джур³, Т. В. Носова³

¹ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

² Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро, Україна

³ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

КОМПЛЕКСНЕ МОДИФІКУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СПЛАВІВ

Метою роботи є розробка технології комплексного модифікування багатокомпонентних сплавів системи Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co дисперсними композиціями. Основною модифікатора служив нанодисперсний модифікатор — карбонітрид титану Ti (C, N). Нанопорошки модифікатора отримано на установці плазмохімічного синтезу. Науковою новизною роботи є встановлення механізму дії модифікатора в розплаві. Експериментальним шляхом встановлено оптимальну кількість модифікатора, що вводиться. Випробувано температурно-часові параметри модифікування. Встановлено закономірності впливу модифікування дисперсною тугоплавкою композицією карбіду титану на підвищення комплексу властивостей багатокомпонентного нікелевого сплаву. Отримані результати використано на машинобудівному підприємстві для підвищення механічних і експлуатаційних властивостей жароміцних сплавів для лопаток газотурбінного двигуна. В результаті проведених досліджень з модифікування багатокомпонентних нікелевих сплавів ЖСЗДК, ЖС6У для лопаток газотурбінних двигунів встановлено, що введення комплексного модифікатора на основі нанопорошків карбонітриду титану у розплав призводить до істотної зміни структури сплавів. Наночастки карбонітриду титану служать додатковими центрами кристалізації. Формування при модифікуванні дрібнозернистої структури і зміцненого твердого розчину призводить до підвищення механічних і експлуатаційних властивостей сплаву, що має важливе практичне значення. Досягнуто значне підвищення міцнісних і пластичних властивостей: σ_B підвищено на 10 %, σ_T — на 13 %, δ — на 10...30 %, КСЧ — на 44 %. Довговічність сплаву, в залежності від напруги випробувань, підвищилася до 30 %. Після випробувань на жаростійкість глибина корозії в модифікованих сплавах зменшилась у середньому на 25 %, що підтверджує ефект модифікування.

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

M. V. Grekova¹, A. V. Kalinin²,
Ye. O. Djur³, T. V. Nosova³

¹ Yangel Pivdenne State Design Office, Dnipro, Ukraine

² Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering
and Architecture, Dnipro, Ukraine

³ Oles Honchar Dnipro National University,
Dnipro, Ukraine

AN INTEGRATED MODIFICATION OF MULTICOMPONENT ALLOYS

The aim of the task has been the development of technology of the complex modification of Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co multicomponent alloys by dispersible compositions. A nanodispersed modifier titanium carbonitrides Ti(C, N) served as a basis of a modifier. Nanopowders of a modifier were obtained on the facility of plasma-chemical synthesis. The scientific novelty of the work is to establish the mechanism of modifier action in the fusion. The optimum amount of modifier input was determined experimentally. The temperature-temporal options of modification were tested. Regularities of modification effect of titanium carbide dispersible refractory composition on improving complex properties of multicomponent

nickel alloy were defined. The results obtained were used at the machine-building enterprise to increase the mechanical and operational properties of heatproof alloys for gas turbine engine blades. As a result of research on the modification of multicomponent nickel alloys ZS3DK, ZS6U for gas turbine engine blades it was defined that the introduction of complex modifier on the basis of nanopowder of titanium carbonitride into the fusion leads to the substantial modification of alloy structure. Nanoparticles of titanium carbonitride are the additional centers of crystallization. Formation at the modification of the fine-grained structure and strengthened solid solution leads to the improvement of mechanical and exploitation properties of the alloy, that has an important practical value. The considerable increase in strength and plastic properties was attained. Corresponding parameters' augmentations are by 10 % in σ_v , 13 % in σ_T , 10...30 % in δ , and 44 % in KCU. The longevity of alloy increased by 30 % depending on the tension of tests. After tests on heat-tolerance, the depth of corrosion in the modified alloys is diminished by 25 % on average that confirms the effect of the modification.

Keywords: nickel alloy, nanocomposites, structure, mechanical and operational properties, modification.