Н. Є. КАЛІНІНА¹, О. В. КАЛІНІН², Т. В. НОСОВА¹, С. І. МАМЧУР¹, Н. І. ЦОКУР¹¹ Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, Україна² ВНЗ «Придніпровська національна академія будівництва та архітектури», Україна

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДИСПЕРСНОГО МОДИФІКУВАННЯ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

У роботі запропоновано засоби підвищення властивостей нікелевих сплавів для авіаційних газотурбінних двигунів за рахунок удосконалення існуючих сплавів. Роботоздатність авіаційного двигуна залежить від якості робочих лопаток турбіни, які виготовляють з жароміцних сплавів. За проведеними дослідженнями одержані результати дослідно-промислових випробувань комплексу механічних властивостей, високотемпературної корозії багатокомпонентного жароміцного нікелевого сплаву ХН59МВТКЮЛ (системи Ni-Cr-W-Co-Al-Ti-Mo). В роботі запропоновано використання модифікаторів. Ефективним засобом диспергування структурних складових сплавів макро- і мікрорівнях є модифікування багатокомпонентних сплавів дисперсними і нанодисперсними композиціями. На основі порошку нітриду титану розроблено технологічний режим модифікування нікелевого розплаву дисперсними композиціями плазмохімічного синтезу. Модифікатор застосовували у таблетованому вигляді. Досліджували різне дозування модифікатора: 0,1...0,03 % за масою. Запропонований засіб дозволяє за мінімальних втрат на етапі плавки вводити необхідну кількість модифікатора. Температурно-часові параметри модифікування: 1650 °С, час дії модифікатора – 5...7 хвилин. Проведені дослідження комплексу механічних властивостей та особливості формування структури модифікованого сплаву. За результатами досліджень отримали суттєве зменшення зерна сплаву у порівнянні з вихідним станом. Модифікування обумовило підвищення механічних властивостей: міцності на 10 %, ударної в'язкості – на 35...40 %. Порівняння немодифікованого сплаву з отриманим дозволило підвищити корозійну стійкість сплаву ХН59МВТКЮЛ в окислювальному середовищі. За температури 1000 °С глибина корозії зменшилась на 15 %. Підвищення стійкості до високотемпературної корозії пов'язано з більш рівномірним розподілом надлишкових фаз в структурі модифікованого сплаву. Встановлено механізм дії тугоплавких частинок модифікатора у нікелевому розплаві, які є зародками первинної кристалізації. Результати роботи мають практичну цінність під час виготовлення робочих лопаток з жароміцних нікелевих сплавів високої якості з підвищеними параметрами жароміцності та жаростійкості.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав; технологія; модифікування; жароміцність; жаростійкість; нітрид титану.

Вступ

Підвищення якості, механічних, експлуатаційних властивостей виробів авіакосмічної техніки може бути успішно вирішено розробкою та удосконаленням існуючих сплавів. У сучасних авіаційних газотурбінних двигунах (ГТД) доля жароміцних сплавів складає до 40% маси двигуна. При цьому роботоздатність всього авіаційного двигуна визначається якістю робочих лопаток турбіни. Умови роботи лопаток у ГТД стають все більш напруженими у зв'язку з підвищенням температури газу на вході у турбіну, збільшенням швидкості польоту і ресурсу роботи двигуна. Екстремальні умови потребують використання перспективних матеріалів зі стабільною структурою і властивостями.

Ефективним засобом диспергування структурних складових сплавів на макро- і мікрорівнях є модифікування багатокомпонентних сплавів дисперсними і нанодисперсними композиціями [1, 5].

1. Постановка задачі дослідження

Вирішення матеріалознавчих питань складається у створенні високо жароміцних і жаростійких сплавів зі стабільною структурою, які експлуатуються за високих температур і напружень. Метою даної роботи є розробка технології модифікування багатокомпонентного нікелевого сплаву системи Ni-Cr-W-Co-Al-Ti-Mo дисперсними і нанодисперсними композиціями, які отримані методом плазмохімічного синтезу. Необхідно вивчати структурні зміни в сплавах, взаємозв'язок структури з властивостями та вплив легуючих елементів на структуроутворення в багатокомпонентних нікелевих сплавах.

Матеріал досліджень. Матеріалом досліджень є жароміцний нікелевий сплав ХН59МВТКЮЛ, який використовують для виготовлення робочих лопаток газотурбінного двигуна (таблиця 1).

Таблиця 1

Хімічний склад жароміцного нікелевого сплаву
ХН59МВТКУЛ (ЖСЗДК)

Марка сплаву	Вміст елементу, % за масою								
	Al	Ti	Cr	Mo	W	Co	C	Mn, Si	Ni
ЖСЗДК	4,8	3,0	12,5	3,8	10,0	9,0	0,10	≤0,2	Осн.

Модифікатором є композиційний матеріал на основі нанодисперсного нітриду титану TiN, який було одержано плазмохімічним синтезом.

2. Результати досліджень

Розроблено технологію вводу модифікатора у розплав, яка складається з: оптимізації складу комплексного модифікатора; визначення засобу вводу модифікатора у розплав; встановлення температурно-часового режиму плавки, випуску і заливання розплаву у форму.

Для вводу порошків модифікатора у розплав розроблено технологію, яка складається з наступних стадій:

- у спеціальному атриторі змішували порошки подрібненого нікелевого сплаву з нанопорошком модифікатора;
- пресування порошків у сталевій пресформі;
- введення порошку у рідкий розплав жароміцного нікелевого сплаву [2].

Атриторну обробку сумішей порошків проводили послідовно. Спочатку відбувалося плющення і розмол окремих часток. Потім руйнування і перебудова структури часток за рахунок холодного зварювання різнорідних часток і утворення шарової структури. На завершальній стадії відбувалося стоншення компонентів шарів та підвищення внутрішньої однорідності часток.

З метою подрібнення макроструктури, отримання стабільної дрібнокристалічної структури лопатки, було опробовано модифікування сплаву ЖСЗДК дисперсними наноконпозиціями у таблетованому вигляді. Досліджували різне дозування модифікатора: від 0,1 до 0,3 % за масою з урахуванням 50%-вого засвоєння розплавом.

В якості основи модифікатора запропоновано дисперсний порошок нітриду титану. Склад спресованих таблеток: порошок TiC розміром 1 мкм; порошок алюмінію розміром 20 мкм; подрібнений порошок нікелевого сплаву [3].

Таблетка комплексного модифікатора, після вводу до розплаву, розчиняється у ньому і рівномірно розподіляється за об'ємом розплаву під час індукційного змішування.

Запропонований засіб модифікування дозволяє за мінімальних втрат вводити необхідну кількість модифікатора. Введення модифікатора здійснювали

на технологічному етапі плавки, який забезпечує максимальний технологічний ефект. Температурно-часові параметри модифікування: $t=1650\pm 10$ °C, на 100 °C вище за температуру плавлення, час витримки = 5 хвилин [4].

Структура сплаву – гетерофазна, яка є дисперсною γ_1 – фазою на основі інтерметалідних сполук Ni3Ti, які рівномірно розподілені у матриці. Тугоплавкі легуючі елементи (W, Mo, Co) збільшують область існування γ_1 – фази. Легуючі елементи алюміній і титан є γ_1 – утворюючими, входять у γ_1 твердий розчин та є основними зміцнювачами, утворюють інтерметаліди Ni3Ti, Ni3Al. Елементи Co, Mo і Cr входять до γ – твердого розчину. W розподіляється у γ та γ_1 твердому розчині. Таким чином, зміцнення складнолегованого нікелевого сплаву утворюється за рахунок зміцнення γ - твердого розчину і утворення дисперсних фаз.

Температуру модифікування визначали, виходячи з діаграм стану Ni-Cr і Ti-Ni [6-8].

В даній роботі застосовано спосіб модифікування [7] за рахунок подрібнення зерен нікелевого твердого розчину, що є результатом зародкової дії тугоплавких часток модифікатора, які спеціально вводили до розплаву. Механізм дії модифікатора у розплаві полягає у тому, що на поверхні дисперсних часток TiN відбувається зародження первинних кристалів матричної γ – фази.

Дослідження макроструктури сплаву у вихідному стані показало, що структура сплаву неоднорідна за перетином. Вихідні зразки мали крупнокристалічну структуру з розміром зерен 3-10 мм. Модифіковані зразки мали однорідну, дрібнозеренну структуру з розміром зерен до 3-5 мм. Таким чином, внаслідок модифікування середній розмір зерна зменшився у 2 рази.

Формування під час модифікування зміцненого нікелевого твердого розчину і більш розвиненої зеренногранічної структури призвело до підвищення комплексу механічних властивостей модифікованого сплаву у порівнянні з не модифікованим станом σ_B підвищено на 10 %; $\sigma_{0,2}$ – на 14%; КСЧ значно підвищено на 35-40 % (рис.1).

Жаростійкість сплаву оцінювали за результатом випробувань на високотемпературну корозію в окислювальній атмосфері. Після кожної термоекспозиції вимірювали глибину міжкристалічної корозії. Встановлено, що в усіх зразках спостерігалось внутрішнє окислення. Більш інтенсивне високотемпературне окислення спостерігали у не модифікованому зразку на глибину

30 мкм порівняно з модифікованим зразком, де глибина корозії становила 25 мкм. Таким чином, досягнуто зниження корозійного пошкодження сплаву на 15 %.

Рис. 1. Механічні властивості нікелевого сплаву ЖСЗДК до та після модифікування:
а – до модифікування;
б – після модифікування

Висновки

Для обробки нікелевих розплавів запропоновано модифікатор на основі нітриду титану з розміром частинок 100-200 нм, одержаний способом плазмохімічного синтезу.

Розроблено технологічну інструкцію виплавки та модифікування нікелевого сплаву ЖСЗДК, яка містить: виплавку сплаву; модифікування таблетованим модифікатором при температурі 1560 ± 10 °С, час витримки 5...7 хвилин; заливання у керамічні форми при температурі 950 °С; температура гомогенізації відливок 1240 °С протягом 4 годин. Подальше операції механічної обробки, металургійного та металографічного контролю згідно існуючого технологічного процесу виготовлення лопаток з нікелевого сплаву.

Дослідженням макро- і мікроструктури нікелевих сплавів встановлено зменшення розміру зерна модифікованого сплаву у 2 рази та подібнення структурних складових.

Механічні випробування зразків показали підвищення механічних параметрів у модифікованому стані сплавів σ_v на 10 %; ударної в'язкості КСУ на 35...40 % у порівнянні з вихідними зразками. Випробування зразків на жаростійкість показали зменшення глибини корозії при температурі 1000 °С в модифікованому стані у середньому на 15 %, що підвищує ефективність обробки сплавів нанодисперсними матеріалами.

Література

1. Каблов, Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей [Текст] / Е. Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 631 с.
2. 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.
3. Патент України на корисну модель № 82163, МПК C22C 19/03. Комплексний модифікатор нікелевих сплавів [Текст] / Н. Є. Калініна, А. Є. Калиновська, В. Т. Калінін, З. В. Віліщук, Т. В. Носова. – № 201300612 ; Заявл. 17.01.2013 ; Опубл. 25.07.2013. Бюл. № 14.
4. Богуслаев, В. О. Авиационно-космичні матеріали та технології [Текст] / В. О. Богуслаев, О. Я. Качан, Н. Є. Калініна. – Запоріжжя : Мотор Січ, 2005. – 385 с.
5. Симс, Ч. Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [Текст] : пер. с англ. / Ч. Т. Симс, У. К. Хагеля, Н. С. Столофф. – М. : Металлургия, 1995 – Кн. 1. – 384 с.
6. Диаграммы равновесия двойных металлических систем [Текст] : справочник ; под ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1997. – 56 с.
7. Saunders, N. The Application of CALPHAD Calculations to Ni-based Superalloys [Text] / N. Saunders, M. Fahrman, S. J. Small // In «Superalloys 2000». – TMS, Warrendale, 2000. – 803 p. DOI: 10.7449/2000/Superalloys_2000_803_811.

References

1. Kablov, E. N. Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigatelei [Cast vanes of gas turbine engines]. Moscow, MISA Publ., 2001. 631 p.
2. Kalinina, N. E., Kalinovskaya, A. E., Kalinin, V. T. Tekhnologicheskie osobennosti nanomodifitsirovaniya liteynykh zharoprochnykh nikelovykh splavov [Technological features of nanomodifying casting heat-resistant nickel alloys]. Kompessornoe i energeticheskoe mashinostroenie, 2013, no. 1(31), pp. 54-56.
3. Kalinina, N. E., Kalinovska, A. E., Kalinin, V. T., Vilishchuk, Z. V., Nosova T. V. Kompleksnyy modifikator nikelovykh splaviv [Complex modifier of nickel alloys]. Patent Ukraine, № 82163, 2013.
4. Bohuslayev, V. O., Kachan, O. Ya., Kalinina, N. Ye. Aviatsiyno-kosmichni materialy ta tekhnolohiyi [Aerospace materials and technologies]. Zaporizhzhya, Motor Sich Publ., 2005. 385 p.
5. Sims, Ch. T., Stoloff, N. S., Hagel, W. C. Supersplavy II: Zharoprochnye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok [Superalloys II: High-Temperature Materials for

Aerospace and Industrial Power]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1995, Book 1. 384 p.

6. *Diagrammy ravnovesiya dvoynykh metallicheskih sistem* [Equilibrium diagrams of binary metal systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 56 p.

7. Saunders, N., Fahrman, M., Small, S. J. The Application of CALPHAD Calculations to Ni-based Superalloys. In *«Superalloys 2000*. TMS, Warrendale, 2000. 803 p. DOI: 10.7449/2000/Superalloys_2000_803_811.

Поступила в редакцию 31.04.2021, рассмотрена на редколлегии 20.05.2021

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДИСПЕРСНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Н. Е. Калинина, О. В. Калинин, Т. В. Носова, С. И. Мамчур, Н. И. Цокур

В работе предложены средства повышения свойств никелевых сплавов для авиационных газотурбинных двигателей за счет совершенствования существующих сплавов. Работоспособность авиационного двигателя зависит от качества рабочих лопаток турбины, которые изготавливают из жаропрочных сплавов. По проведенным исследованиям полученные результаты опытно-промышленных испытаний комплекса механических свойств, высокотемпературной коррозии многокомпонентного жаропрочного никелевого сплава ХН59МВТКЮЛ (системы Ni-Cr-W-Co-Al-Ti-Mo). В работе предложено использование модификаторов. Эффективным средством диспергирования структурных составляющих сплавов макро- и микро уровнях является модификация многокомпонентных сплавов дисперсными и нанодисперсными композициями. На основе порошка нитрида титана разработан технологический режим модификации никелевого расплава дисперсными композициями плазмохимического синтеза. Модификатор применяли в таблетированной форме. Исследовали разное дозирование модификатора: 0,1...0,03 % по массе. Предложенный способ позволяет при минимальных потерях на этапе плавки вводить необходимое количество модификатора. Температурно-временные параметры модификации 1650⁰С, время действия модификатора – 5...7 минут. Проведены исследования комплекса механических свойств и особенности формирования структуры модифицированного сплава. По результатам исследований получили существенное измельчение зерна сплава по сравнению с исходным состоянием. Модифицирование обусловило повышение механических свойств: прочности на 10 %, ударной вязкости - на 35...40 %. Сравнение наномодифицированного сплава с полученным позволило повысить коррозионную стойкость сплава ХН59МВТКЮЛ в окислительной среде. При температуре 1000 ⁰С глубина коррозии уменьшилась на 15 %. Повышение устойчивости к высокотемпературной коррозии связано с более равномерным распределением избыточных фаз в структуре модифицированного сплава. Установлен механизм действия тугоплавких частиц модификатора в никелевом расплаве, которые являются зародышами первичной кристаллизации. Результаты работы имеют практическую ценность при изготовлении рабочих лопаток из жаропрочных никелевых сплавов высокого качества с повышенными параметрами жаропрочности и жаростойкости.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав; технология; модифицирование; жаропрочность; жаростойкость; нитрид титана.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF DISPERSIBLE RETROFITTING OF HEATPROOF NICKELIFEROUS ALLOYS FOR BLADES OF TURBO-ENGINES

N. Kalinina, O. Kalinin, T. Nosova, S. Mamchur, N. Tsokur

The paper proposes means of improving the properties of nickel alloys for aircraft gas turbine engines by improving the existing alloys. The efficiency of an aircraft engine depends on the quality of the turbine rotor blades, which are made of heat-resistant alloys. According to the studies, the obtained results of pilot tests of a complex of mechanical properties, high-temperature corrosion of a multicomponent high-temperature nickel alloy ХН59МВТКЮЛ (Ni-Cr-W-Co-Al-Ti-Mo systems). The paper proposes the use of modifiers. An effective means of dispersing the structural components of alloys at the macro and micro levels is the modification of multicomponent alloys with dispersed and nano dispersed compositions. Based on titanium nitride powder, a technological regime for modifying nickel melt with dispersed compositions of plasma chemical synthesis has been developed. The modifier was used in tablet form. Investigated different dosages of the modifier: 0.1...0.03 % by weight. The proposed method allows, with minimal losses at the melting stage, to introduce the required amount of modifier. The temperature and time parameters of the modification are 1650⁰С, the modifier action time is 5...7 minutes. Investigations of the complex mechanical properties and the peculiarities of the formation of the structure of the modified alloy have been carried out. According to the research results, significant refinement of the alloy grain was obtained in comparison with the initial state. The modification led to an increase in mechanical properties: strength by 10 %, impact strength by 35...40 %. Comparison of the nano-modified alloy with the obtained one made it possible to increase the corrosion resistance of the ХН59МВТКЮЛ alloy in an oxidizing environment. At a temperature of 1000 ⁰С, the

corrosion depth decreased by 15 %. An increase in resistance to high-temperature corrosion is associated with a more uniform distribution of excess phases in the structure of the modified alloy. The mechanism of action of refractory particles of a modifier in a nickel melt, which are the nuclei of primary crystallization, has been established. The results of the work are of practical value in the manufacture of rotor blades from high-quality heat-resistant nickel alloys with increased parameters of heat resistance and heat resistance.

Keywords: heat-resistant nickel alloy; technology; modification; heat resistance; heat resistance; titanium nitride.

Калініна Наталія Євграфівна – д-р техн. наук, проф. кафедри технології виробництва, Дніпровський Національний університет ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Калінін Олександр Васильович – канд. техн. наук, науковий співробітник ДВМЗ «Придніпровська національна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна.

Носова Тетяна Валеріївна – канд. техн. наук, доцент кафедри технології виробництва Дніпровського Національного університету ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Мамчур Стелла Ігорівна – канд. техн. наук, доцент кафедри технології виробництва Дніпровського Національного університету ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Цокур Наталія Іванівна – аспірант кафедри технології виробництва Дніпровського Національного університету ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Natalija Kalinina – Dr. of Tech. Sciences, Prof. Department of Production Technology, Dnipro, National University Oles Honchar, Dnipro, Ukraine,
e-mail: kalinina.dnu@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3810-6778.

Oleksandr Kalinin – Candidate of Tech. Sciences, Research Fellow, Prydniprovsk National Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine,
ORCID: 0000-0003-3597-158X.

Tetjana Nosova – Candidate of Tech. Sciences, Associate Professor, Department of Production Technology, Dnipro National University Oles Honchar, Dnipro, Ukraine,
e-mail: amaretanya0512@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0855-568X.

Stella Mamchur – Candidate of Tech. Sciences, Associate Professor. Department of Production Technology, Dnipro National University Oles Honchar, Dnipro, Ukraine,
e-mail: 1964stella1965@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8146-8849.

Natalija Tsokur – PhD student of the Department of Production Technology of Dnipro National University Oles Honchar, Dnipro, Ukraine, e-mail: monicaa13.06@gmail.com