

## Література

1. Lin, L. Calculation of isothermal sections of three ternary Ti–Zr–X systems / L. Lin, L. Delaey, O. Van der Biest, e.a. // *Scr. Mater.* – 1996. – Vol. 34, No. 9. – P. 1411–1416.
2. Cacciamani, G. Equilibrium between MB<sub>2</sub> (M = Ti, Zr, Hf) UHTC and Ni: a thermodynamic database for the B–Hf–Ni–Ti–Zr system / G. Cacciamani, P. Riani, & F. Valenza // *CALPHAD.* – 2011. – Vol. 35, No. 4. – P. 601–619.
3. Turchanin, M. A. Thermodynamic Assessment of the Cu–Ti–Zr System. II. Cu–Zr and Ti–Zr Systems / M. Turchanin, P. Agraval, A. Abdulov // *Powder Metall. Met. Ceram.* – 2008. – Vol. 47, No.7-8. – P. 428–446.
4. Bittermann, H. Critical assessment and thermodynamic calculation of the ternary system boron–hafnium–titanium (B–Hf–Ti) / H. Bittermann, P. Rogl // *J. Phase Equilib.* – 1997. – Vol. 18, No.1. – P. 24–47.
5. Bittermann, H. Critical assessment and thermodynamic calculation of the ternary system C–Hf–Zr (Carbon–Zirconium–Hafnium) / H. Bittermann, P. Rogl // *J. Phase Equilib.* – 2002. – Vol. 23, No. 3. – P. 218–235.
6. Dinsdale, A. T. SGTE data for pure elements / A. T. Dinsdale // *CALPHAD.* – 1991. – Vol. 15, No. 4. – P. 317–425.
7. Andersson, J.-O. Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials science / J.-O. Andersson, T. Helander, L. Höglund, e.a. // *CALPHAD.* – 2002. – Vol. 26, No. 2. – P. 273–312.

Тьомкін Д. О.<sup>1</sup>, Наумик В. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Запорізький машинобудівний завод ім. В. І. Омельченко;*

<sup>2</sup> *Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)*

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ЛИВАРНИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ  
ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНИ НИЗЬКОГО ТИСКУ**

E-mail: vnaumyk@gmail.com

Вивчено вплив металургійних технологічних процесів та хімічних елементів на механічні властивості, довготривалу міцність і структуру ливарних жароміцних нікелевих сплавах (ЖНС).

Розглянуто залежності впливу суми  $Ti + Al$  на зміцнювальну  $\gamma'$ -фазу в ЖНС з різним типом зміцнення, а також вплив ітрію на евтектичні виділення фаз, що скупчуються на межі зерен. Встановлено, що введення в розплав ЖНС 0,136 % лігатури нікель-ітрій сприяє очищенню меж зерен від розміцнювальних фаз.

Проведено дослідження з визначення комплексного впливу легування, модифікування та високотемпературного оброблення розплаву (ВТОР) на структуру і властивості ЖСЗДК-ВІ, який використовується для виготовлення робочих лопаток турбіни низького тиску (вільної турбіни, турбіни вентилятора) авіаційних двигунів і газотурбінних установок.

Встановлено особливості впливу вуглецю, легувальних добавок ніобію і гафнію, модифікувальної добавки ітрію та ВТОР на розподіл, форму карбідів і меж зерен, механічні властивості, тривалу міцність виливків, отриманих із жароміцного сплаву в процесі рівноосної кристалізації. Проведено розрахунки структурної стабільності, збалансованості хімічного складу, а також впливу ніобію та гафнію на механічні властивості сплаву ЖСЗДК-ВІ.

Розглянуто вплив комплексної модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ за металургійними технологічними процесами (легування ніобієм і гафнієм, модифікування ітрієм та проведення ВТОР) на поліпшення структурного стану, міцності та пластичних властивостей жароміцного лиття. За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

Введення в сплав легувальних добавок гафнію і ніобію змінюють хімічний склад матеріалу.

Гафній і ніобій входять у зміцнювальну  $\gamma'$ -фазу додатково зміцнюють її. Беруть участь у вдосконаленні морфології карбідів і підвищують термодинамічну стабільність сплаву.

Визначено допустимі межі легування гафнієм і ніобієм. Концентрація гафнію в сплаві має бути на рівні 0,15...0,25 мас. %. За вмісту гафнію менше 0,15 % у сплаві перебуватимуть пластинчасті карбіди. За вмісту гафнію понад 0,25 % у сплаві утворюватиметься нерівноважна евтектика з температурою плавлення в області 1190 °С.

При вмісті в сплаві ніобію з концентрацією понад 0,5 мас. % відбуватиметься підвищення температури повного розчинення  $\gamma'$ -фази і зниження температури розчинення евтектики  $\gamma$ - $\gamma'$ , що призводить до зниження технологічності сплаву для термічної обробки.

Модифікування сплаву ітрієм сприяє поліпшенню міжфазної поверхні між інтерметалідною  $\gamma'$ -фазою та твердорозчинною матрицею, стабілізації сприятливої морфології карбідних виділень, а також формуванню їхніх термодинамічно стійких високотемпературних модифікацій, удосконаленню меж зерен.

Встановлено, що оптимальним вмістом ітрію в сплаві ЖСЗДК-ВІ є 0,01 мас. %.

Одним із суттєвих результатів введення ітрію є збільшення в'язкості розплавленого металу та сповільнення зростання твердої фази, що проявляється за вмісту ітрію в діапазоні 0,007...0,015 мас. %.

При збільшенні вмісту ітрію понад 0,015 мас. % спостерігається зниження в'язкості до рівня, не модифікованого сплаву.

При подальшому збільшенні вмісту ітрію відбувається утворення евтектичних інтерметалідних фаз  $\text{Ni-Y}_2\text{Ni}_{17}$  з частковим окисненням. Весь ітрій буде зв'язуватися в інтерметаліди, і не впливатиме на формування інших фазових складових сплаву.

Застосування ВТОР з перегрівом розплаву вище першої і другої точки рівноважного стану дає змогу підвищити властивості міцності ЖНС, пластичність, ударну в'язкість, межу тривалої міцності, опір виникненню та розвитку тріщини, що загалом дає змогу збільшити тривалість експлуатації деталей. Підвищення характеристик матеріалу відбувається за рахунок отримання в структурі деталей високого ступеня фізичної та хімічної однорідності мікроструктури, малих розмірів дендритів і ширини меж зерен, і значного зменшення величини пір, що дає змогу зменшити розміри карбідів та карбонітридів, отримати в сплаві карбіди у вигляді дискретних дрібних частинок.

Виходячи з літературних даних і практичного досвіду, під час модифікування жароміцних сплавів тільки ітрієм відбувається підвищення межі міцності,

подовження та ударної в'язкості, однак, отримання максимальних значень механічних властивостей є нестабільним.

На підставі проведених досліджень було створено технологію модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ [Y+Nb+Hf+ВТОР].

Розроблено технологічну схему модернізації сплаву із застосуванням комплексного впливу, що включає легування ніобієм (НБШО 0,5 %), лігатурою гафній-нікель (ГФН-10 0,230...0,260 %), модифікування лігатурою нікель-ітрії (ІтН-1 0,158...0,184 %), а також проведенням ВТОР (перегрівання розплаву до 1830...1870 °С, витримка 10...12 хвилин). Запропоноване рішення забезпечує високі значення ударної в'язкості та жароміцності.

Під час вивчення впливу модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ на механічні властивості та тривалу міцність, порівняно з вихідною плавкою, було виявлено збільшення відносного подовження приблизно в 1,2 рази, межі тимчасової міцності приблизно в 1,1 рази.

Збільшення ударної в'язкості в даному випадку забезпечується виділенням і рівномірним розподілом дискретних і глобулярних карбідів і карбонітридів, що зумовлено обробкою розплаву ітрієм, а додаткове введення гафнію та проведення ВТОР дало змогу збільшити ударну в'язкість в 2 рази.

За результатами випробувань на тривалу міцність відбулося збільшення часу до руйнування при температурі 850 °С та навантаженні 350 МПа приблизно в 4 рази для варіанту технології [Y+Nb+Hf+ВТОР], що, імовірно, пов'язано з додаванням гафнію і ніобію, а також поліпшеним станом меж зерен.

Встановлено закономірності зростання часу до руйнування. При переході від зразків із грубими межами зерен до зразків із тонкими межами приріст часу руйнування до при високій температурі становить  $\Delta\tau = 58,7$  год.

Також встановлено приріст часу до руйнування  $\Delta\tau' = 103,6$  години при переході від серійної технології модифікування сплаву ЖСЗДК-ВІ ітрієм до додаткового введення ніобію та гафнію за варіантом технології [Y+Nb+Hf+ВТОР].

Проведені теоретичні розрахунки для реакції карбідоутворення дають змогу припустити, що при вмісті 0,015 мас. % ітрію і 0,25 мас. % гафнію для повноцінного

утворення сферичних карбідів потрібно щонайменше 0,02 мас. % вуглецю. Разом з тим, для реакції 0,5 мас. % ніобію необхідно 0,06 мас.% вуглецю, і для реакції 0,239 мас. % титану необхідно 0,06 мас. % вуглецю.

В умовах технології [Y + Nb + Hf + ВТОР] з концентрацією вуглецю близько 0,06 мас. % і нижче, спостерігається його дефіцит, що викликає перерозподіл легувальних елементів на користь зміцнення структури сплаву.

Сформульовано основні рекомендації щодо проведення модернізації сплаву у виробництві.

Складено додаткові технічні вимоги з вузьким інтервалом легування сплаву ЖСЗДК-ВІ. Інтервал легування перевірено розрахунковими методами, що засвідчило збалансованість системи легування сплаву та його відповідність умовам структурної стабільності.

У процесі проведення дослідних плавок проводити попередній відбір проб хімічного складу сплаву з оцінкою необхідності коригування хімічного складу на відповідність додатковим технічним умовам.

Технологія модернізації сплаву ЖСЗДК-ВІ [Y+Nb+Hf+ВТОР] дає змогу підвищити рівень механічних властивостей деталей, що працюють в умовах високих механічних навантажень і температур.

За результатами промислових випробувань рекомендовано застосування дослідної технології нарівні із серійною технологією виготовлення лопаток турбіни, з використанням комплексно модернізованого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Встановлено підвищення рівня ударної в'язкості з 21,7 до 48,3 Дж/см<sup>2</sup> та часу до руйнування при випробуваннях на тривалу міцність з 150 до 671 год.