

УДК 621.74.045:669.24:21.981

Тьомкін Д.О.¹, Педаш О.О.², Наумик О.О.³, Наумик В.В.⁴

¹ заступник головного металурга Запорізький машинобудівний завод ім. В.І. Омельченко, Запоріжжя, Україна

² канд. техн. наук. АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна

³ д-р техн. наук, професор НУ«Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

⁴ аспірантка НУ«Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЛИВАНИХ ЖАРОМІЩНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Ливарні жароміцні нікелеві сплави широко використовуються в авіаційних газотурбінних двигунах і наземних установках. Високий рівень жароміцності цих сплавів обумовлений γ' -фазою – твердим розчином на основі інтерметалідної сполуки Ni_3Al , частинки якої створюють надійні перешкоди для ковзання та переповзання дислокацій в умовах високотемпературної повзучості. Основна її частина утворюється під час розпаду пересиченого твердого розчину [1–5].

При багатокомпонентному легуванні в γ' -фазі атоми нікелю замінюють хімічні елементи, в наступному порядку за здатністю, що зменшується:

кобальт, залізо, хром, молібден, вольфрам. Імовірність заміщення атомів алюмінію зростає в ряду: хром, молібден, вольфрам і максимальна для титану, гафнію, танталу [5].

У жароміцних нікелевих сплавах вміст основних елементи Ti і Al, що утворюють γ' -фазу, знаходиться на рівні: Ti + Al – близько 4...8 % [1–3].

Проведені розрахунки методом CALPHAD (JMatPro) нікелевих жароміцних сплавів: ВХ4Л-ВІ, ЕП693, ЖСЗЛС, ЖСЗДК-ВІ, ЖС6К-ВІ, ЖС6У-ВІ, показали залежність зростання вмісту γ' -фази від збільшення суми вмісту титану і алюмінію (табл. 1).

Для сплавів, дисперсійно твердіють ВХ4Л-ВІ, ЕП693 в яких виділення зміцнюючої γ' -фази відбувається при проведенні термічної обробки методом старіння:

Сплав	(Ti + Al), %	вміст γ' -фази, %
ВХ4Л-ВІ	1,4 – 2,6	11,63 – 21,60
ЕП693	2,7 – 3,9	21,96 – 31,95

Для інших жароміцних нікелевих сплавів:

ЖСЗЛС	4,8 – 6,0	37,80 – 43,90
ЖСЗДК-ВІ	6,5 – 7,3	54,74–57,76
ЖС6К-ВІ	7,5 – 9,2	65,30 – 72,92
ЖС6У-ВІ	7,1 – 8,9	61,89 – 69,19

Слід зазначити, що при значенні суми Ti + Al більше 8,2 % по межах зерен при металографічному дослідженні можуть виявлятися потовщення (збільшення білої облямівки), грубі виділення карбідної фази, евтектичні виділення.

Автори робіт [1–3, 5] показують, що у нікелевих сплавах обмежується допустимий вміст хрому, молібдену, вольфраму, ніобію та танталу.

Дослідження концентраційних областей сучасних жароміцних нікелевих сплавів демонструє, що в них досягнуто максимального вмісту γ' -утворюючих елементів [1–3, 5]. Надмірне легування нікель-хромистих сплавів ферритоутворюючими елементами: хромом, молібденом, вольфрамом, титаном і алюмінієм веде до появи двофазності ($\gamma+\alpha$) і σ -фази, та інших фаз несприятливої морфології, що різко погіршує властивості сплавів [6].

Відомо [1, 5], що модифікуючий вплив РЗМ на структуру жароміцних сплавів проявляється у подрібненні мікрозерен, зменшенні розмірів дендритного осередку, зміні морфології та розподілу неметалевих включень.

Ітрій як поверхнево-активний елемент, накопичуючись на межі твердої та рідкої фаз, викликає підвищення в'язкості розплаву та уповільнення зростання твердої фази за рахунок гальмування дифузійних процесів [2]. Відомо, що оптимальним вмістом ітрію у сплаві є 0,01%, що забезпечує стабілізацію карбідів типу МС, без утворення самостійних евтектичних фаз [5].

Дослідженнями [7] сплаву ЖСБУ-VI, який є схильним до утворення виділень по межах зерен, було встановлено, що після обробки нікель ітрієвої лігатурою цього не відбувається. Але слід враховувати, що використання модифікування сплаву призводить до зменшення розміру макрозерна і як наслідок зниження жароміцності.

Відомо [6], що при кімнатних і знижених температурах випробування, характеристики сталей і сплавів міцності більш високі у сплавів з більш дрібним зерном. При вищих температурах сплави з крупнозернистою структурою показують кращу жароміцність.

Запобіганню утворення виділень по межах зерен сприяє рафінування розплаву методами переплаву та високотемпературної обробки розплаву (ВТОР).

При проведенні переплаву сплаву досягається перша точка рівноважного стану розплаву, при якій багато тугоплавких включень залишаються в розплаві. Ці тугоплавкі включення, будучи центрами кристалізації, знижують вільну енергію розплаву, що, мабуть, призводить до гальмування виділень за межами зерен.

Під час проведення ВТОР досягається друга точка рівноважного стану розплаву, коли в ньому розчиняється переважна більшість тугоплавких включень, і навіть починається руйнація кластерів.

Необхідно розуміти, що при очищенні зерен модифікуванням РЗМ домішки наявні в розплаві, по межах зерен не виділяються, а залишаються в об'ємі металу. Такий сплав підлягає рафінуванню методами переплаву або ВТОР. Допускається використання кондиційних відходів у кількості до 50 % від маси металозавалювання з обробкою РЗМ при проведенні рафінування методами переплаву або ВТОР.

Висновки

В роботі описано роль γ' -фази та умови її утворення. Розглянуто наслідки перелегування жароміцних нікелевих сплавів титаном та алюмінієм.

Описані способи боротьби з виділеннями по межах зерен та потовщеннями меж зерен. При виплавленні жароміцних нікелевих сплавів рекомендовано проведення модифікування РЗМ та застосування рафінування розплаву методом переплаву та високотемпературної обробки.

Список використаних джерел

1. Sims C.T. and Hagel W.C. The Superalloys. John Wiley & Sons, New York, 1972.
2. Reed R. C. The Superalloys Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge University Press. 2006. P. 23.
3. Satyanarayana D. V. V. and Prasad N. E. Nickel-based superalloys

Aerospace Materials and Material Technologies. Vol. 1: Aerospace Materials. Singapore: Springer Nature, Pte Ltd., 2017. P. 199–228.

4. Perrut M., Caron P., Thomas M., and Couret A. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and γ -TiAl alloys. *Comptes Rendus, Physique*. 2018. 8, № 19. P. 657–671.

5. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: «МИСИС», 2001. 632 с.

6. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Metallurgia, 1969. 748 с.

7. Тьомкін Д. О., Клочихін В. В., Данілов С. М., Педаш О. О., Наумик О. О., Наумик В. В. Вплив модифікування ітрієм на структуру і властивості виливків, отриманих з ворття сплаву ЖС6У-В1 *Нові матеріали і технології в металургії і машинобудуванні*. 2022. № 2. С. 50–56.