

ЗБІЛЬШЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ЗАВДЯКИ ОПТИМІЗАЦІЇ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

**Глотка О.А., к.т.н., доцент, Ольшанецький В.Ю., д.т.н., професор,
Хвостак В.В., аспірант, Національний університет
«Запорізька політехніка»**

***Анотація.** Збільшення тривалості експлуатації деталей газотурбінного тракту є вимушеним та необхідним напрямом підвищення конкурентоспроможності сучасних виробничих підприємств. Одним з таких напрямів є оптимізація хімічного складу жароміцних нікелевих сплавів в межах марочного складу. Морфологію, склад та розмір карбідів типу МС не можливо змінити термічною обробкою, тому встановлення залежностей між хімічним складом та вищевказаними характеристиками є необхідною задачею.*

***Ключові слова:** карбіди типу МС, структура, хімічний склад, температура розчинення (виділення) карбідів, жароміцні нікелеві сплави.*

INCREASE IN PERFORMANCE OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS DUE TO CHEMICAL COMPOSITION OPTIMIZATION

Glotka O.A., Ph.D., associate professor, Olshanetskyi V.Yu., doctor of technical sciences, professor, Khvostak V.V., post-graduate student, National University "Zaporizhia Polytechnic"

***Abstract.** Increasing the duration of operation of the parts of the gas turbine tract is a forced and necessary direction of increasing the competitiveness of modern production enterprises. One of these directions is the optimization of the chemical composition of heat-resistant nickel alloys within the limits of the standard composition. The morphology, composition, and size of carbides of the MS type cannot be changed by heat treatment, so establishing the relationship between the chemical composition and the above-mentioned characteristics is a necessary task.*

***Key words:** MS-type carbides, structure, chemical composition, temperature of dissolution (exclusion) of carbides, nickel-based superalloys.*

Вступ

Розробка нових і оптимізація існуючих ливарних жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення лопаток газотурбінних двигунів цивільного та військового призначення, є важливою науково-технічною проблемою. З огляду на чутливість структурних складових до концентрації легуючих елементів, виникають труднощі в оцінці очікуваного комплексу властивостей виробів від хімічного складу або структурного-фазового стану [1-8].

***Мета:** встановлення залежностей впливу легуючих елементів на хімічний склад, тип та морфологію первинних карбідів в структурі багатокомпонентної системи типу Ni-Cr-Co-Al-W-Re-Ta-Mo-Nb-C.*

Матеріал і методика дослідження

Моделювання термодинамічних процесів, що протікають при кристалізації (охлажденні) або нагріванні в структурі сплавів здійснювалися методом CALPHAD. В багатокомпонентній системі (Ni-5Cr-9Co-6Al-8,3W-4Re-4Ta-1Mo-1,5Nb-0,15C) діапазон варіювання елементами був обраний з міркувань максимальної і мінімальної кількості елемента, що вводиться в жароміцні нікелеві сплави (ЖНС). Таким чином, для дослідження було обрано карбідоутворюючі елементи, що входять до карбідів типу MC, в наступних діапазонах легування (% по масі): вуглець 0,02-0,2; тантал 0,5-12; ніобій 0,1-4.

Експериментально склад карбідів визначали на електронному мікроскопі РЕМ-106И с використанням системи енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу. Даним методом вивчали морфологію та хімічний склад карбідів в структурі сплаву. Переклад значень якісного в кількісний аналіз виробляли автоматично за програмою приладу. Відносна похибка методу становить $\pm 1\%$ (по масі). Результати розрахунків типу карбідів і їх хімічного складу порівнювали з експериментальними даними, отриманими за допомогою електронної мікроскопії.

Результати дослідження обробляли статистичними методами з встановленням кореляційних залежностей типу «параметр-властивості» у вигляді математичних рівнянь математичних моделей, які оптимально описують ці залежності. Отримані залежності мають досить високі коефіцієнти критерію кореляції $R^2 \geq 0,85$ і можуть використовуватися для прогнозуючих розрахунків зазначених показників з відносною похибкою близько 4%.

Результати дослідження та їх обговорення

Вивчення виділення фаз в процесі кристалізації дослідженої системи проводили в температурному діапазоні 1600-20°C, за цих температур найбільш імовірним є виділення основних фаз в наступному порядку: карбіди типу MC; γ - твердий розчин; евтектика $\gamma + \gamma'$; інтерметаліди типу γ' - фази на основі (Ni₃Al); карбіди типу M₂₃C₆. Оскільки на карбіди типу M₂₃C₆ можливо вплинути термічною обробкою і змінити їх морфологію, то подальша робота буде присвячена карбідам MC, хімічний склад, морфологію та тип яких можливо змінити технологією литва та хімічним складом сплаву.

На рис. 1, а показано, що в структурі об'ємна частка первинних карбідів MC залежить від вмісту вуглецю в складі сплаву і оптимально описується лінійною функцією. У той же час, на (рис. 1 б) показано, що вплив вуглецю на температуру t_L^{MC} розчинення (або виділення) карбідів типу MC має складний характер і оптимально описується логарифмічними рівняннями.

Тантал має потужну карбідоутворюючу здатність, формує первинні карбіди MC; при цьому він позитивно впливає як на жароміцність, так і корозійну стійкість жароміцних нікелевих сплавів. При незначному введенні в

сплав танталу (0,5%) спостерігається його підвищення і в складі первинного карбиду МС до 18,5%. Тантал також підвищує температуру розчинення (виділення) первинних карбідів МС (рис. 2), що оптимально описується параболічною залежністю. Також це впливає на форму карбідів та зв'язок карбідів з матрицею. Саме сферична форма є оптимальною та має найменшу поверхневу енергію.

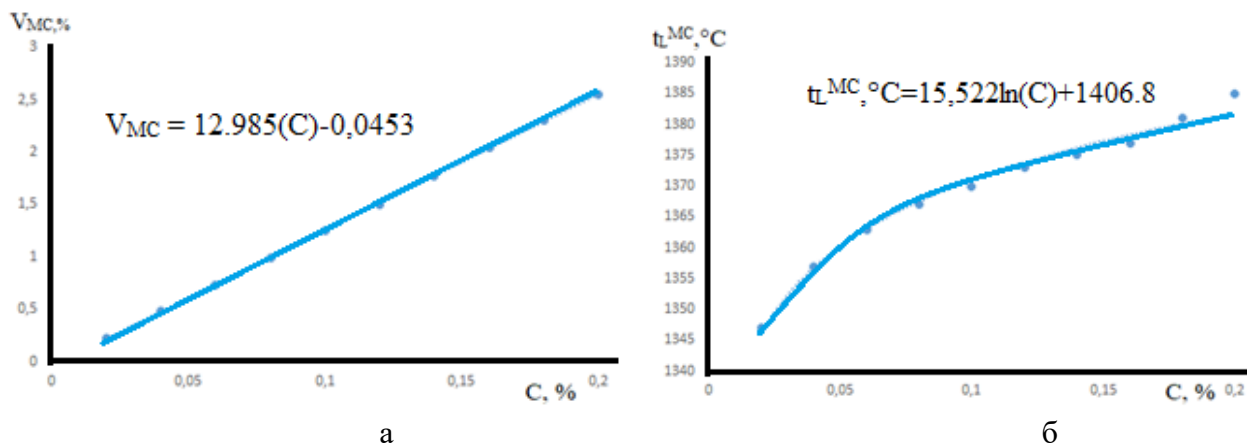
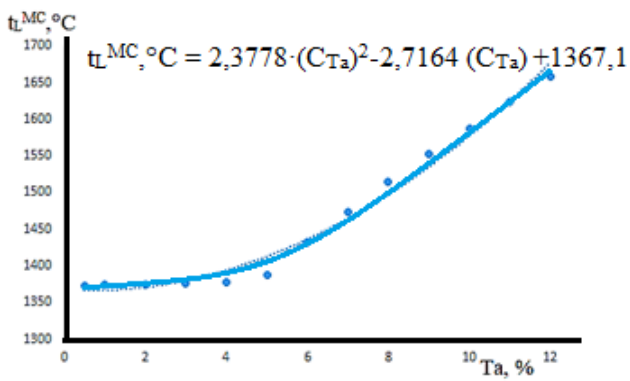


Рисунок 1 – Зміна кількості карбідів типу МС (а) і температури розчинення карбідів МС (в) від вмісту вуглецю в сплаві

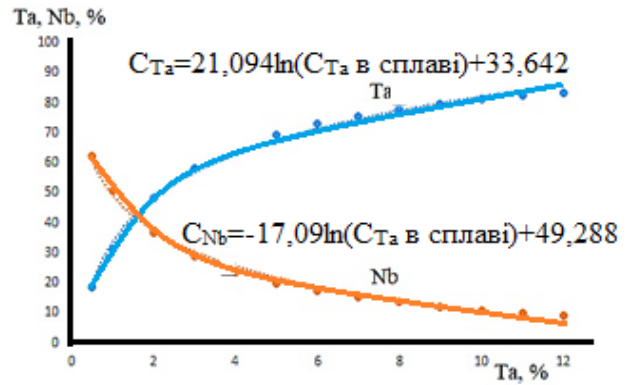
Розрахунково встановлено, що при 2% танталу в сплаві, карбід МС змінює свою основу і стає карбідом на основі танталу (рис. 2), причому зміна оптимально описується логарифмічною функцією. При цьому спостерігається зниження за вказаними залежностями вмісту ніобію, вольфраму і молібдену. Перехід карбиду МС в карбід на основі танталу призводить до збільшення міжатомних зв'язків, що сприяє збільшенню температури розчинення (виділення) карбиду. Зміна вмісту танталу в сплаві не впливає на хімічний склад вторинних карбідних фаз.

Ніобій впливає на температуру утворення первинних карбідів підвищуючи по параболічній залежності, що пояснюється змінами сил міжатомних зв'язку в цих виділеннях.

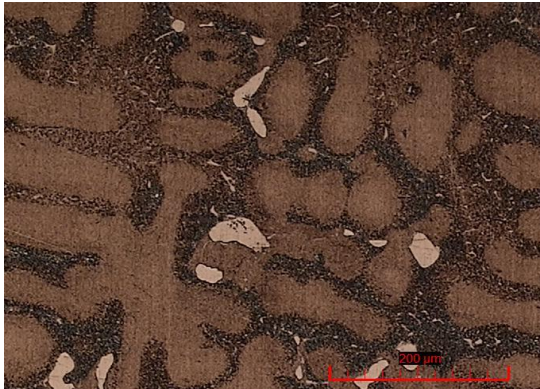
На (рис. 3) показано, що зі збільшенням вмісту ніобію в сплаві зростає його концентрація в первинному карбіді і перевищує концентрацію танталу в карбіді при вмісту ніобію в сплаві більше 3%. Так вміст танталу в карбіді МС знижується з 82,96% до 38,57%, а вольфраму з 7,64% до 1,1%, що призводить до утворення карбиду на основі ніобію. Також ніобій приводить до утворення карбідів МС з округлою формою, що знижує їх негативний вплив на властивості.



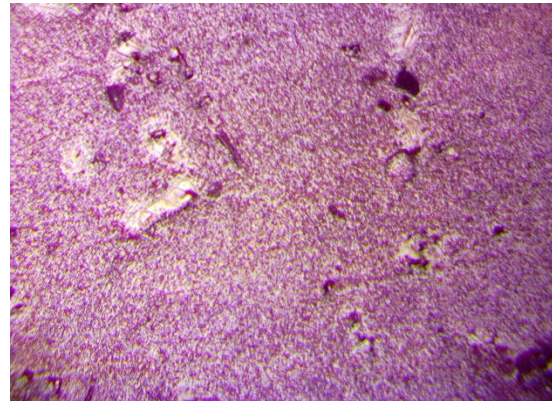
а



б

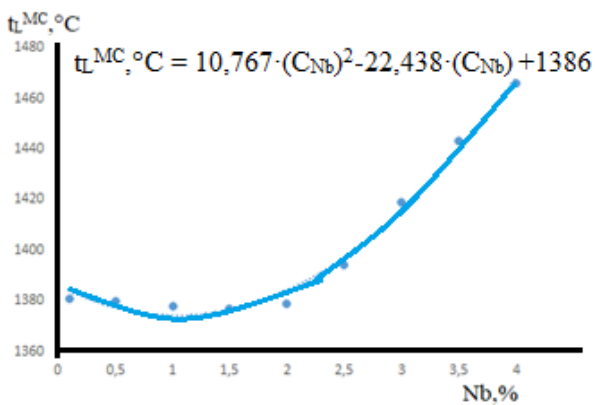


в

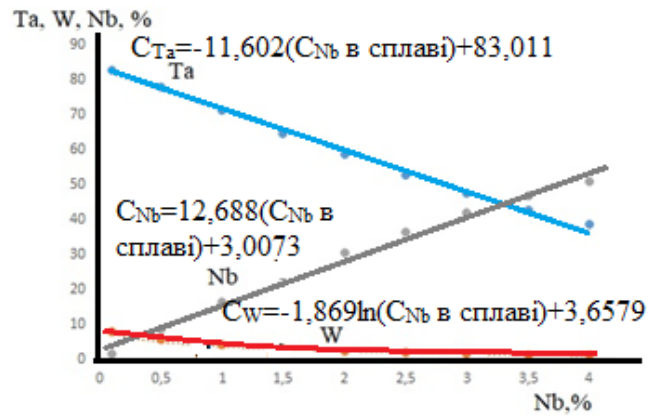


г

Рисунок 2 - Залежність температури розчинення карбідів MC (а), кількості танталу та ніобію в карбіді MC (б) від вмісту вуглецю в сплаві та морфологія карбідів типу NbC (в) і TaC (г)



а



б

Рисунок 3 - Температурна залежність розчинення (виділення) карбідів типу MC (а); кількість танталу, вольфраму та ніобію в MC карбіді (б) від вмісту ніобію в складі сплаву

Висновки

1. Встановлено залежності впливу легувальних елементів на температури розчинення (виділення) карбідів в сплаві системи Ni-5Cr-9Co-6Al-8,3W-4Re-

4Ta-1Mo-1,5Nb-0,15C. Показано, що зміни в ході кривих залежності температури від вмісту елемента тісно корелюють з термодинамічними процесами, що відбуваються в системі, тобто на кривих спостерігаються екстремуми, які супроводжують зміну стехіометрії карбідів або виділення нових фаз.

2. Показано, що при підвищенні сумарної концентрації карбідоутворюючих елементів, ускладнюється і хімічний склад карбідів. При концентрації більше 2% мас. Та в сплаві, в карбїду MC зміст танталу переважає над вмістом ніобію, це так само призводить до зниження концентрації вольфраму і молибдену в карбїду. Виявлено, що при концентрації ніобію більше 3% мас. в сплаві його вміст в первинному карбїду перевищує вміст танталу і карбїд стає на основі Та. Таким чином, легувальні елементи тісно взаємодіють в багатокомпонентній системі.

Література

1. Saunders, N. The Application of CALPHAD Calculations to Ni-Based Superalloys / N. Saunders, M. Fahrman, C. J. Small // In «Superalloys 2000» eds. K. A. Green, T. M. Pollock and R.D. Kissinger.- TMS. - Warrendale. - 2000. - P. 803–811.

2. Симс, Ч.Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, У. К. Хагель ; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1995. – Кн. 1, 2. – 384 с.

3. P. Jonšta Structural characteristics of nickel super alloy INCONEL 713LC after heat treatment / P. Jonšta, Z. Jonšta, J. Sojka, L. Čížek, A. Hernas // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. Vols. 21. – PP. 29-32.

4. B. G. Choi MC Carbide Decomposition during Thermal Exposure of Polycrystalline Ni-Base Superalloys / B. G. Choi // Solid State Phenomena. – 2007. Vols. 124-126. –PP. 1505-1508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.124-126.1505>

5. Li Jiang M₂C and M₆C carbide precipitation in Ni-Mo-Cr based superalloys containing silicon/ Li Jiang, Wen-Zhu Zhang, Zhou-Feng Xu, He-Fei Huang, Xiang-Xi Ye, Bin Leng, Long Yan, Zhi-Jun Li, Xing-Tai Zhou // Materials & Design. – 2016. - Volume 112. – Pp. 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.075>

6. B. Seiser TCP phase predictions in Ni-based superalloys: Structure maps revisited // B. Seiser, R. Drautz, D.G. Pettifor / Acta Materialia. – 2011. - Volume 59. – Pp. 749-763. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.013>

7. Rui Hu Precipitation behavior of grain boundary M₂₃C₆ and its effect on tensile properties of Ni–Cr–W based superalloy/ Rui Hu, Jinshan Li, Guanghai Bai // Materials Science and Engineering A. – 2012. - №548. – P. 83-88. DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.092

8. R Yonghua Characterization of M₂₃C₆ carbide precipitated at grain boundaries in a superalloy / R Yonghua, Hu Geng, G Yongxiang // Metallography. – 1989. - №22(1). – P. 47-55. DOI: [10.1016/0026-0800\(89\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0026-0800(89)90021-9)