

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.245.018.044:620.193.53

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.2.109

ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДУ ПЕРВИННИХ КАРБІДІВ БАГАТО-КОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ Ni-5Cr-9Co-6Al-8,3W-4Re-4Ta-1Mo-1,5Nb-0,15C

Ольшанецький В.Ю., Глотка О.А.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Анотація. Вивчено специфіку розподілу легувальних елементів в карбідах багатокомпонентної системи Ni-5Cr-9Co-6Al-8,3W-4Re-4Ta-1Mo-1,5Nb-0,15C. Методом CALPHAD проведено моделювання термодинамічних процесів кристалізації. Отримано залежності впливу легувальних елементів на температури розчинення (виділення) карбідів. Результати термодинамічних розрахунків хімічного складу карбідів наведені в порівнянні з експериментальними даними, отриманими методом електронної мікроскопії на мікроскопі PEM-106И з системою енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу. Показано, що отримані залежності тісно корелюють з термодинамічними процесами, що відбуваються в системі.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави спрямованої кристалізації, система легування, метод CALPHAD, структура, склад карбідів.

Вступ

Жароміцні нікелеві сплави широко застосовуються для виготовлення робочих лопаток, найбільш навантажених деталей стаціонарних газотурбінних установок (ГТУ). Основними фазами таких сплавів є γ -твердий розчин на основі нікелю і основна зміцнююча γ' -фаза на основі інтерметаліда Ni₃Al, крім того присутні карбіди типу MeC, Me₂₃C₆ і Me₆C, які виділяються на границях і всередині зерен у вигляді дисперсних включень.

Аналіз публікацій

Розробка нових і оптимізація існуючих ливарних сплавів для виготовлення лопаток газотурбінних двигунів різного призначення, є важливою науково-технічною проблемою. З огляду на чутливість структурних складових до концентрації легуючих елементів, виникають труднощі в оцінці очікуваного комплексу властивостей лопаток від оптимізації хімічного складу або структурного стану сплавів [1–5].

Для сучасних газотурбінних двигунів зазначені деталі, які мають складну форму, виготовляють з багатокомпонентних жароміцних сплавів на основі нікелю, кобальту і заліза методами спеціального, спрямованого або монокристалічного лиття [6–10].

Мета і постановка завдання

Основною метою цієї роботи є вивчення специфіки впливу легуючих елементів на розподіл первинних карбідів в структурі, їх

топологію, морфологію і їх складу для багатокомпонентної системи типу Ni-5Cr-9Co-6Al-8,3W-4Re-4Ta-1Mo-1,5Nb-0,15C за допомогою розрахункового методу прогнозування CALPHAD (пасивний експеримент) в порівнянні з даними, отриманими методом електронної мікроскопії (активний експеримент).

Виклад основного матеріалу

Моделювання термодинамічних процесів, що протікають при кристалізації (охлажденні) або нагріванні в структурі сплавів здійснювалися методом CALPHAD [6].

В системі багатокомпонентного легування (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 первинних карбідів, в наступних діапазонах легування (% по масі): вуглець 0,02-0,2; тантал 0,5-12; ніобій 0,1-4.

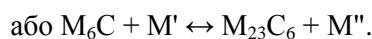
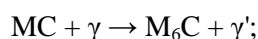
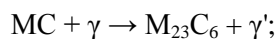
Експериментально склад карбідів визначали на електронному мікроскопі PEM-106И з використанням системи енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу. Даним методом вивчали морфологію та хімічний склад карбідів в структурі сплаву. Переклад значень якісного в кількісний аналіз виробляли автоматично 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 в програмному комплексі Microsoft Office в пакеті EXCEL 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%.

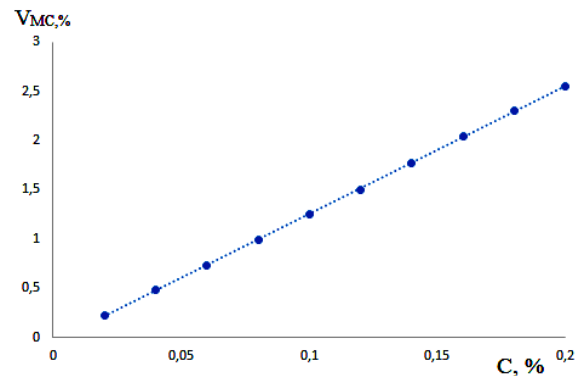
Вивчення виділення фаз в процесі кристалізації дослідженої системи, в температурному діапазоні (1600-20°C) показало, що найбільш імовірним є виділення основних фаз в наступному порядку: карбіди типу MC; γ - твердий розчин; евтектика $\gamma + \gamma'$; інтерметаліди типу γ' - фази на основі (Ni₃Al); карбіди типу M₂₃C₆.

Карбіди M₂₃C₆ утворюються в сплавах з помірним або високим вмістом хрому під час низькотемпературної обробки і в процесі експлуатації при 760 ... 980°C внаслідок розпаду карбідів MC і з «залишкового» вуглецю, розчиненого в матриці. Зазвичай вони розташовуються по межах зерен, іноді уздовж ліній двійників, на дефектах упаковки, кінцях двійників і можуть бути центрами зародження пластин σ - фази. До складу карбідів цього типу входять також молібден і вольфрам. Внаслідок несприятливого розташування на кордонах зерен карбіду M₂₃C₆ можуть чинити негативний вплив на межу тривалої міцності. Зникнення карбідів типу MC з утворенням карбідів M₆C і M₂₃C₆ відбувається за відомими реакцій [11, 12]:

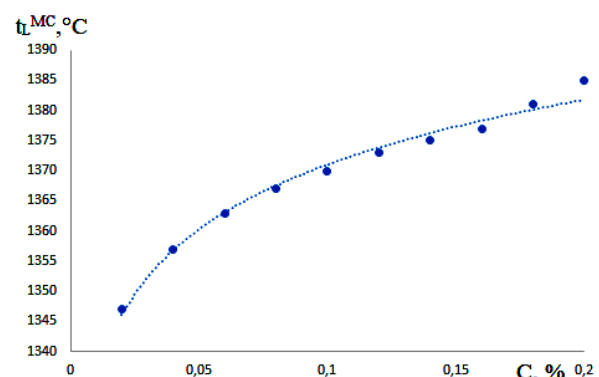


На рис. 1 (а) показано, що в структурі об'ємна частка первинних карбідів MC залежить від вмісту вуглецю в складі сплаву і оптимально описується лінійною функцією (табл. 1). У той же час, на (рис. 1 б) показано, що вплив вуглецю на температуру t_L^{MC} розчинення (або виділення) карбідів типу MC

має складний характер і оптимально описується логарифмічними рівняннями (табл. 1).



а



б

Рис. 1. Зміна кількості карбідів типу MC (а) і температури розчинення карбідів MC (в) від вмісту вуглецю в сплаві

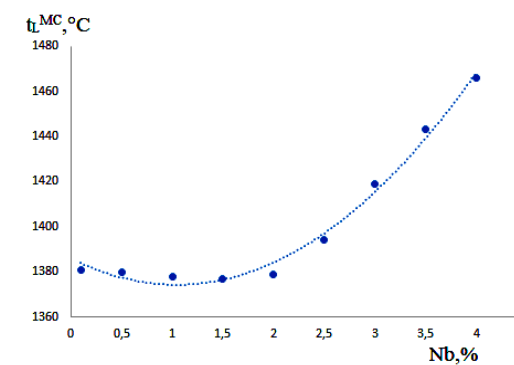
Ніобій, як сильний карбідоутворюючий елемент, з танталом формує первинний карбід MC на змішаній основі [13, 14]. Ніобій впливає на температуру утворення первинних карбідів (рис. 2, а), підвищуючи по параболічній залежності (Табл. 1), що пояснюється змінами сил міжатомних зв'язку в цих виділеннях.

На (рис. 2, б) 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 MC знижується з 82,96% до 38,57%, а вольфраму з 7,64% до 1,1%, що призводить до утворення карбіду на основі ніобію.

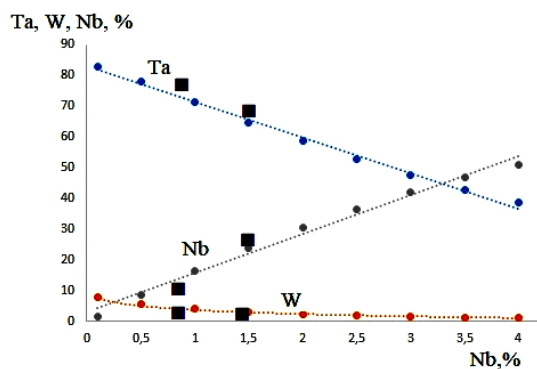
Зміна вмісту ніобію в сплаві не впливає на хімічний склад вторинного карбіду. Середній вміст легуючих елементів в M₂₃C₆ знаходиться на рівні: 61,97Cr-9,3Ni-6,03Mo-7,1Co-4,9C-10,7W.

Таблиця 1 – Залежності температури розчинення (виділення) карбідів і вміст легуючих елементів в карбідах від вмісту легуючих елементів в сплаві

| Легуючий елемент | Температури розчинення (виділення) карбідів, °C | Кількість карбідів (V) і вміст елементів в карбіді (C), % мас. |
|------------------|---|---|
| C | $t_L^{MC}, ^\circ C = 15,522 \ln(C) + 1406,8$ $t_L^{M_{23}C_6}, ^\circ C = 384,24(C) + 865,33$ | $V_{MC} = 12,985(C) - 0,0453$ $V_{M_{23}C_6} = 19,512(C) + 0,0187$ |
| Ta | $t_L^{MC}, ^\circ C = 2,3778 \cdot (C_{Ta})^2 - 2,7164 \cdot (C_{Ta}) + 1367,1$ | карбіди MC: $C_{Ta} = 21,094 \ln(C_{Ta} \text{ в сплаві}) + 33,642$ $C_{Nb} = -17,09 \ln(C_{Ta} \text{ в сплаві}) + 49,288$ $C_W = -1,954 \ln(C_{Ta} \text{ в сплаві}) + 5,4091$ $C_{Mo} = -0,685 \ln(C_{Ta} \text{ в сплаві}) + 1,7157$ |
| Nb | $t_L^{MC}, ^\circ C = 10,767 \cdot (C_{Nb})^2 - 22,438 \cdot (C_{Nb}) + 1386$; | карбіди MC: $C_{Nb} = 12,688(C_{Nb} \text{ в сплаві}) + 3,0073$; $C_{Ta} = -11,602(C_{Nb} \text{ в сплаві}) + 83,011$; $C_W = -1,869 \ln(C_{Nb} \text{ в сплаві}) + 3,6579$ |



а



б

Рис. 2. Температурна залежність розчинення (виділення) карбідів типу MC (а); кількість танталу, вольфраму та ніобію в MC карбіді (б) від вмісту ніобію в складі сплаву

Примітка – експериментальні значення хімічного складу карбідів нанесені на розрахункові залежності в виді ■ точок.

Відомо [15, 16], що тантал, маючи потужну карбідоутворюючу здатність, формує первинні карбіди MC; при цьому він позитивно впливає як на жароміцність, так і корозійну

стійкість ЖНС. При незначному введенні в сплав танталу (0,5%) спостерігається його підвищення і в складі первинного карбіді MC до 18,5%. Встановлено підвищення танталом температури розчинення (виділення) первинних карбідів MC (рис. 3, а), що оптимально описується параболическою залежністю (табл. 1).

Розрахунково встановлено, що при 2% танталу в сплаві, карбід MC змінює свою основу і стає карбідом на основі танталу (рис. 3, б), причому зміна оптимально описується логарифмічною функцією (табл. 1). При цьому спостерігається зниження за вказаними залежностями вмісту ніобію, вольфраму і молібдену (рис. 3, б, в). Перехід карбіді MC в карбід на основі танталу призводить до збільшення міжатомних зв'язків, що сприяє збільшенню температури розчинення (виділення) карбіді (рис. 3, а). Зміна вмісту танталу в сплаві не впливає на хімічний склад вторинних карбідних фаз.

Результати розрахунку фазового складу, отримані CALPHAD-методом, в подальшому порівнювали з експериментальними даними, отриманими за допомогою електронної мікроскопії в режимі мікрозондування на розрвовому електронному мікроскопі РЕМ-106І. Типова морфологія первинних карбідів, яка найбільш часто зустрічається в структурі сплавів даного класу у вигляді окремих блоків (рис. 4, точки 2, 4, 6). Карбіди типу $M_{23}C_6$ в даному сплаві присутні в переривчастих блокової і пластинчастої формах (рис. 4, точки 1, 3, 5). Найбільш доцільним є блоковий тип виділень вторинних карбідів, оскільки в цьому випадку маємо нижчий рівень концентрації напружень з матрицею.

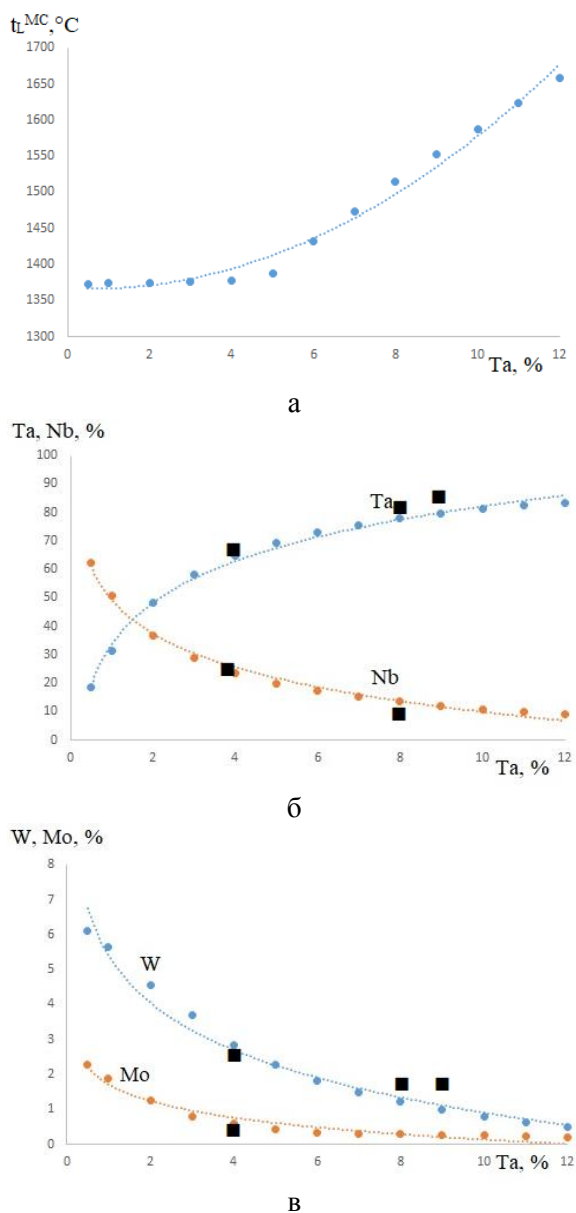
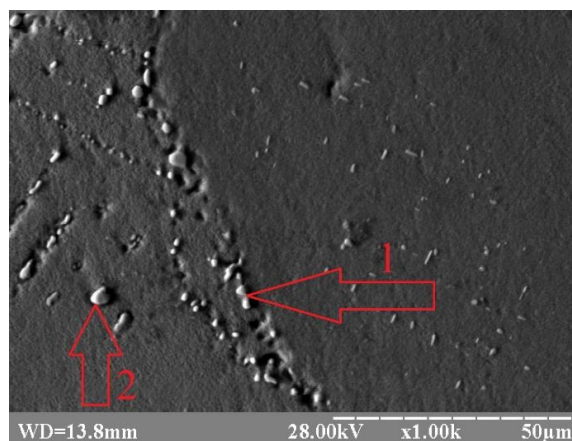


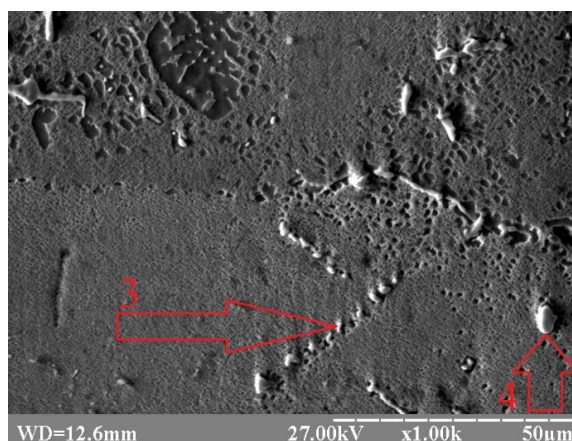
Рис. 3. Температурна залежність розчинення (виділення) карбідів типу МС (а); кількість танталу та ніобію в МС карбіді (б); вольфраму та молібдену в МС карбіді (в) від вмісту танталу в складі сплаву

Склад карбідів визначали експериментально методом РСМА за допомогою електронного мікрозонду. Наведені експериментальні дані узгоджуються з результатами термодинамічних розрахунків, отриманими CALPHAD-методом.

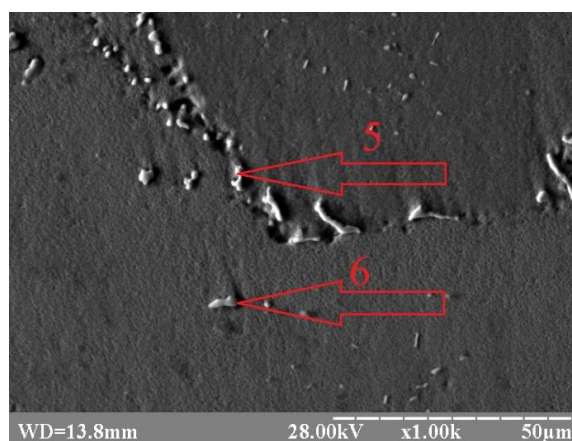
Експериментально встановлено, що до складу карбідів МС входять тантал, ніобій, вольфрам і молібдену (табл. 2). Спектри рентгенівських випромінювань, отримані від характерних точок, наведені на рис. 5. Похибки визначення елементів даним методом не перевищували $\pm 1\%$ (по масі).



а



б



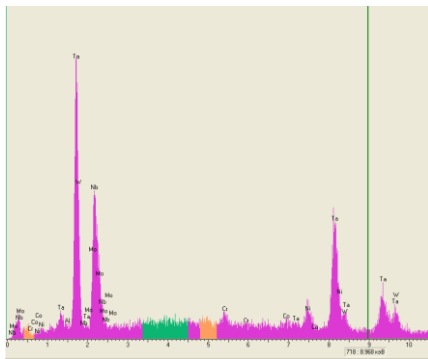
в

Рис. 4. Типова морфологія первинних і вторинних карбідів сплавів ЖС32-ВІ (а), ЖС32Б-ВІ(б), ЖС32Е-ВІ(в)

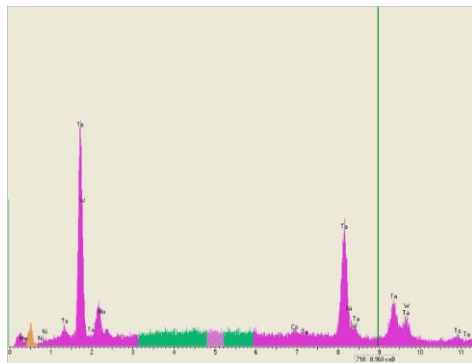
В табл. 2 показано, що розрахункові та експериментальні дані добре узгоджуються між собою практично за всіма елементами (відхилення між розрахунковими і експериментальними значеннями не перевищує $\pm 2\%$).

Таблиця 2 – Хімічний склад карбідів розраховані за отриманими залежностями і отримані експериментально методом РСМА при 20 °С

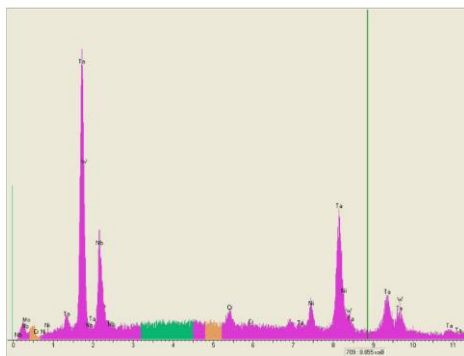
| Метод отримання результатів | Вміст елементу, % по масі | | | | | | | |
|--|---------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | Ta | Nb | W | Mo | Co | Ni | Cr | C |
| ЖС32-ВІ | | | | | | | | |
| Розрахунковий МС | 64,85 | 23,73 | 2,85 | 0,6 | - | - | 0,36 | 7,61 |
| Експериментальний МС (рис. 7, точка 2) | 62,51 | 24,63 | 4,58 | 0,41 | 0,11 | - | 0,15 | 7,61 |
| ЖС32Б-ВІ | | | | | | | | |
| Розрахунковий МС | 89,62 | - | 3,78 | 0,22 | - | - | 0,16 | 6,22 |
| Експериментальний МС (рис. 7, точка 4) | 88,3 | - | 2,2 | 3,08 | - | - | 0,2 | 6,22 |
| ЖС32Е-ВІ | | | | | | | | |
| Розрахунковий МС | 80,16 | 8,08 | 2,26 | - | - | - | 0,21 | 6,84 |
| Експериментальний МС (рис. 7, точка 6) | 80,81 | 9,8 | 1,9 | - | 0,17 | 0,23 | 0,25 | 6,84 |



а



б



в

Рис. 5 Спектри рентгенівського випромінювання отримані від характерних точок сплавів ЖС32-ВІ (а), ЖС32Б-ВІ(б), ЖС32Е-ВІ(в)

В цілому, розрахункові дані, отримані CALPHAD-методом по визначенню типу і хімічного складу карбідів, а так же наведені розрахунки показали задовільну збіжність і узгодженість з експериментальними даними.

Висновки

На основі комплексного підходу, розрахункового та експериментального, для багатокомпонентних жароміцних сплавів отримані нові регресійні моделі, що дозволяють адекватно прогнозувати хімічний склад карбідів за хімічним складом сплаву, це дозволило реалізувати рішення задачі розрахункового прогнозування складу карбідів за хімічним складом сплаву, що підтверджено отриманими експериментальними даними.

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.

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

Література

- Balyts'kyi, O.I., Krokmal'nyi, O.O. Pitting corrosion of 12Kh18AG18Sh steel in chloride solutions. *Materials Science*, vol. 35, N 3, 389–394 (1999). <https://doi.org/10.1007/BF02355483>
- Balyts'kyi, O.I., Mochul's'kyi, V.M. & Ivas'kevych, L.M. Evaluation of the Influence of Hydrogen on the Mechanical Characteristics of Complexly Alloyed Nickel Alloys. *Mater Sci* 51, 538–547 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9873-9>.
- Bao-ping Wu Microstructure and stress rupture properties of polycrystal and directionally solidified castings of nickel-based superalloys / Bao-ping Wu, Lin-han Li, Jian-tao Wu, Zhen Wang, Yan-bin Wang, Xing-fu Chen, Jian-xin Dong, and Jun-tao Li // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2014. – Volume 21. – Pp. 58-64. DOI: 10.1007/s12613-014-0865-1
- Глотка А.А. Распределение легирующих элементов в структуре жаропрочных никелевых сплавов во вторичных карбидах / А.А. Глотка, С.В. Гайдук // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2020. – Том 87 №5. – С. 732-740.
- Глотка А.А. Распределение элементов в карбидах многокомпонентных никелевых сплавов / А.А. Глотка, С.В. Гайдук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2020. – 42 №6. – С. 869-884. DOI: 10.15407/mfint.42.06.0869
- 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.
- Симс, Ч.Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, У. К. Хагелъ ; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : *Металлургия*, 1995. – Кн. 1, 2. – 384 с.
- 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.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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.
- 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.
- Xiaobing Hu Atomic imaging of the interface between M₂₃C₆-type carbide and matrix in a long-term ageing polycrystalline Ni-based superalloy/ Xiaobing Hu, L.Z. Zhou, Y.L. Zhu // *Philosophical Magazine Letters*. -2015. - № 95(4). – P. 237-244. DOI: 10.1080/09500839.2015.1039621
- Ольшанецкий В.Е. Об оценке средней относительной энергии в некоторых моделях пограничных выделений / В.Е. Ольшанецкий // *Металлофизика*. Вып. 50. – К.: *Наукова думка*, 1974. – С. 89-94.
- Гайдук В.В. Влияния состояния межзеренных границ на свойства сплава типа ЖС, содержащего горофильную примесь/ В.В. Гайдук, Б.С. Натапов, В.Е. Ольшанецкий // *Физика металлов и металловедение*. – 1968. – Т.26. – Вып. 5. – С. 853-859.

References

- Balyts'kyi, O.I., Krokmal'nyi, O.O. Pitting corrosion of 12Kh18AG18Sh steel in chloride solutions. *Materials Science*, vol. 35, N 3, 389–394 (1999). <https://doi.org/10.1007/BF02355483>
- Balyts'kyi, O.I., Mochul's'kyi, V.M. & Ivas'kevych, L.M. Evaluation of the Influence of Hydrogen on the Mechanical Characteristics of Complexly Alloyed Nickel Alloys. *Mater Sci* 51, 538–547 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9873-9>.
- Bao-ping Wu Microstructure and stress rupture properties of polycrystal and directionally solidified castings of nickel-based superalloys / Bao-ping Wu, Lin-han Li, Jian-tao Wu, Zhen Wang, Yan-bin Wang, Xing-fu Chen, Jian-xin Dong, and Jun-tao Li // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2014. – Volume 21. – Pp. 58-64. DOI: 10.1007/s12613-014-0865-1
- Глотка А.А. Распределение легирующих элементов в структуре жаропрочных никелевых сплавов во вторичных карбидах / А.А. Глотка, С.В. Гайдук // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2020. – Том 87 №5. – С. 732-740.
- Глотка А.А. Распределение элементов в карбидах многокомпонентных никелевых сплавов / А.А. Глотка, С.В. Гайдук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2020. – 42 №6. – С. 869-884. DOI: 10.15407/mfint.42.06.0869 Patent № US D 712,822 S United States. Solar Roadway panel. 09.09.2014.
- 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.

7. Sims, C.H.T. Supersplavy II. ZHaroprochnye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok / C.H. T. Sims, N. S. Stoloff, U. K. Hagel' ; per. s angl. pod red. R. E. Shalina. – M. : Metallurgiya, 1995. – Kn. 1, 2. – 384 s.
8. 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.
9. 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>.
10. 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>
11. 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>
12. 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
13. 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.
14. Xiaobing Hu Atomic imaging of the interface between M₂₃C₆-type carbide and matrix in a long-term ageing polycrystalline Ni-based superalloy/ Xiaobing Hu, L.Z. Zhou, Y.L. Zhu // Philosophical Magazine Letters . -2015. - № 95(4). – P. 237-244. DOI: 10.1080/09500839.2015.1039621
15. Ol'shaneckij V.E. Ob ocenke srednej otositel'noj energii v nekotorykh modelyah pogranychnykh vydelenij / V.E. Ol'shaneckij // Metallofizika. Vyp. 50. – K.: Naukova dumka, 1974. – S. 89-94.
16. Gajduk V.V. Vliyaniya sostoyaniya mezhzernnykh granic na svoystva splava tipa ZHS, sodержashchego gorofil'nyu primes' / V.V. Gajduk, B.S. Natapov, V.E. Ol'shaneckij // Fizika metallov i metallovedenie. – 1968. – T.26. – Vyp. 5. – S 853-859.

Ольшанецкий Вадим Юхимович, д.т.н., проф. каф. Фізичне матеріалознавство, olshan@zntu.edu.ua, тел. +38 0505773153,
Глотка Олександр Анатолійович, к.т.н., доц. каф. Фізичне матеріалознавство, тел. +380964275651, glotka-alexander@ukr.net
 Національний університет «Запорізька політехніка», 69063, Україна, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.

Predicting the composition of primary carbides of the multicomponent system Ni-5Cr-9Co-6Al-8.3W-4Re-4Ta-1Mo-1.5Nb-0.15C

Abstract. Problem. Development of new and optimization of existing casting alloys for the manufacture of blades of gas turbine engines for various purposes is an important scientific and technical problem. Given the sensitivity of the structural components to the concentration of alloying elements, there are difficulties in assessing the expected set of properties of the blades from the optimization of the chemical composition or structural state of alloys. **Goal.** The aim of this work is to study the specifics of the influence of alloying elements on the distribution of primary carbides in the structure, their topology, morphology and their composition for a multicomponent system such as Ni-5Cr-9Co-6Al-8.3W-4Re-4Ta-1Mo-1, 5Nb-0.15C using the calculation method of CALPHAD prediction (passive experiment) in comparison with the data obtained by electron microscopy (active experiment). **Methodology.** Modeling of thermodynamic processes occurring during crystallization (cooling) or heating in the structure of alloys was carried out by the CALPHAD method. **Results.** The results of thermodynamic calculations of the chemical composition of carbides are presented in comparison with experimental data obtained by electron microscopy on a microscope REM-1061 with a system of energy-dispersion X-ray spectral microanalysis. **Originality.** It is shown that when the total concentration of carbide-forming elements increases, the chemical composition of carbides also becomes more complicated. At a concentration of more than 2% of the mass. But in the alloy, in the carbide of MS, the content of tantalum prevails over the content of niobium, it also leads to a decrease in the concentration of tungsten and molybdenum in the carbide. It was found that when the concentration of niobium is more than 3 wt% in the alloy, its content in the primary carbide exceeds the content of tantalum and the carbide becomes based on Ta. **Practical value.** On the basis of an integrated approach, computational and experimental, for multicomponent heat-resistant alloys, new regression models are obtained that allow to adequately predict the chemical composition of carbides by the chemical composition of the alloy, which is confirmed by the obtained experimental data.

Key words: heat-resistant nickel alloys of directional crystallization, alloying system, CALPHAD method, structure, composition of carbides.

Ol'shanetskii Vadim, professor, Doct. of Science, Material science Department, [tel. olshan@zntu.edu.ua](mailto:olshan@zntu.edu.ua), тел. +38 0505773153,

Glotka Olexander, Ph.D., Assoc. Prof. Material science Department, tel. +380964275651, glotka-alexander@ukr.net, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhykovskogo str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine.