

УДК 669.245.018.044:620.193.53

- Глотка О. А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: glotka-alexander@ukr.net
- Грешта В. Л. канд. техн. наук, професор, ректор Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: greshta@zp.edu.ua
- Ольшанецький В. Ю. д-р техн. наук, професор, зав. кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: olshan@zp.edu.ua

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА МОРФОЛОГІЮ І ТИП КАРБІДІВ В ЖАРОМІЦНОМУ НІКЕЛЕВОМУ СПЛАВІ

Мета роботи. Полягає в оптимізації хімічного складу та морфології карбідів зварюваного жароміцного нікелевого сплаву шляхом зміни хімічного складу, що дозволяє збільшити експлуатаційні властивості корпусних деталей шляхом удосконалення форми та розмірів карбідної складової.

Методи дослідження. Моделювання процесів здійснювалось методом CALPHAD. Вихідними даними були хімічні складу модельних сплавів з різною концентрацією карбідоутворюючих елементів. Результатом обчислення були хімічні складу карбідів, що виділяються у відповідних системах. Експериментальні значення оброблялися методом найменших квадратів з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість» та встановленням математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують ці залежності.

Отримані результати. Встановлено закономірності впливу хімічного складу металу на морфологію та тип карбідів. Показано, що залежно від введених хімічних елементів у системі можуть змінюватись типи карбідів та їх хімічний склад, що призводить до зменшення процесів тріщинотворення у матеріалі. Показано, що зміна складу матеріалу впливає на форму, розмір та склад первинних карбідів.

Наукова новизна. Встановлені залежності багатоконпонентної системи Ni-22,5Cr-19Co-1,9Al-3,7Ti-2W-1,4Ta-1Nb-0,15C дозволяють визначати хімічний склад карбідів по хімічному складу сплаву. Це дає змогу змінювати типи карбідів, їх склад та морфологію, цим самим покращуючи механічні властивості матеріалу, на сам перед втомні та жароміцні характеристики.

Практична цінність. Запропоновано ефективне рішення по встановленню структурно-фазового стану жароміцних нікелевих сплавів шляхом оптимізації їх хімічного складу, що дало змогу підвищити експлуатаційні властивості матеріалу. Встановлені залежності можуть бути використані при оптимізації складу промислових жароміцних ливарних нікелевих сплавів та при розробці нових композицій.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, хімічний склад, морфологія, карбіди, критичні температури.

Вступ

Карбіди типу MC утворюються в процесі кристалізації у вигляді дискретних частинок у міжзеренному та внутрішньозеренному просторі, а також у міждендритних областях рідини через сильну сегрегацію вуглецю, коли його кількість вище 0,05%, а також при температурах трохи нижче температури затвердіння сплаву. При карбідних реакціях сплавах є основним джерелом вуглецю. У порядку зменшення стабільності в жароміцних нікелевих сплавах карбіди розміщуються в ряді HfC, TaC, NbC, TiC [1–5]. Ці карбіди дуже стабільні при низьких температурах, але за більш високих температур мають тенденцію до перетворення (деградації) на вторинні карбіди різних типів.

Вплив карбідів має складний характер, розташовуючись за межами або всередині зерен вони виконують функцію, що модифікує, сприяючи перешко-

джанню рекристалізації, атоми різних елементів можуть заміщати один одного в карбіді, тим самим змінюючи морфологію виділень. Форма карбідів значно впливає на пластичність ливарних жароміцних нікелевих сплавів, у разі утворення шрифтових виділень, вона значно нижча, ніж при утворенні сферичної форми. Розмір карбідів може впливати і на жароміцність [6–17]. Достатньо великі карбіди на межах зерен знижують опір повзучості та втоми сплавів унаслідок високої різниці модулів пружності карбідів та матриці. Також карбіди можуть руйнуватися в процесі термоциклування (пуску та зупинки двигуна) внаслідок розтріскування [18–22].

Мета роботи полягає в оптимізації хімічного складу та морфології карбідів зварюваних жароміцних нікелевих сплавів шляхом зміни хімічного складу сплаву, що дозволить збільшити експлуатаційні властивості корпусних деталей.

Матеріали і методика проведення досліджень

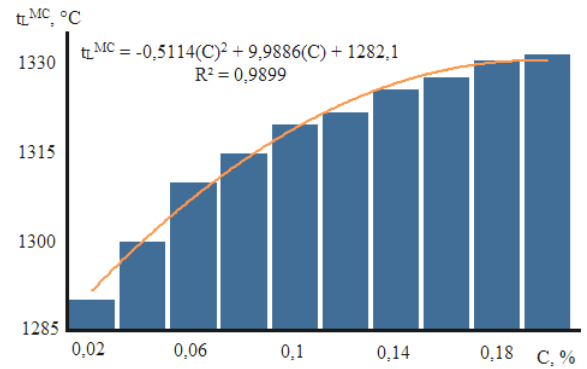
Моделювання процесів виділення карбідів за допомогою методу CALPHAD, дозволяє провести розрахункове прогнозування та порівняльну оцінку впливу легуючих елементів у карбідах. Розрахунки проводилися за кожним дослідженим складом індивідуально при покрової зміні конкретного легуючого елемента за фіксованим складом багатокомпонентної системи.

В системі (Ni-22,5Cr-19Co-1,9Al-3,7Ti-2W-1,4Ta-1Nb-0,15C) діапазон варіювання елементами був обраний з міркувань максимальної та мінімальної кількості елемента, що вводиться в жароміцний нікелевий сплав (ЖНС). Таким чином, для дослідження були обрані карбідоутворюючі елементи в наступних діапазонах легування: вуглець 0,02–0,2 %; ніобій 0,1–4 %; титан 1–6 %; тантал 0,5–12 %, вольфрам 1–16 %, хром 1–35 % за масою.

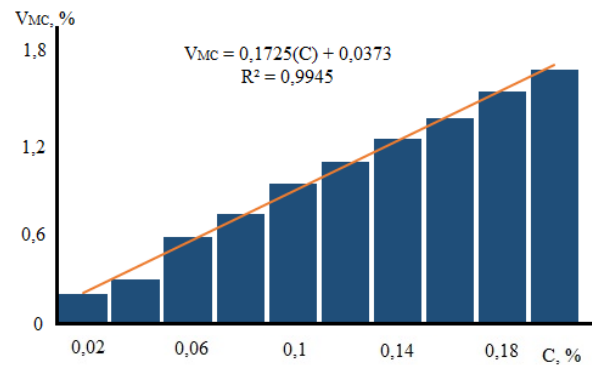
Моделювання процесу кристалізації сплаву здійснювалося методом CALPHAD від температури рідкого стану (1600 °C) до кімнатної температури (20 °C) з температурним кроком 10 °C у всьому діапазоні, що дозволило визначити температурну послідовність виділення фаз у процесі кристалізації. Обчислення проводилися за вихідним хімічним складом сплаву з визначенням найбільш ймовірного виділення, кількості та типу карбідів у структурі, а також їх хімічного складу.

Результати досліджень та їх обговорення

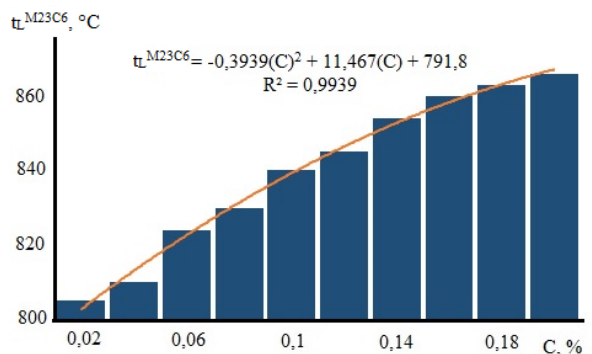
Для сучасних газотурбінних двигунів необхідні матеріали з підвищеними експлуатаційними характеристиками, що мають збільшені міжремонтні інтервали та високі показники жароміцності і ремонтпридатності. Саме такі вимоги висуваються при проектуванні нових матеріалів для корпусних деталей безпілотних літальних апаратів та газотурбінних установок газоперекачувальної техніки. Властивості високотемпературних матеріалів забезпечуються стабільністю структурних складових у процесі експлуатації. Дуже важливим параметром проведення термічної обробки є температура карбідного ліквідусу, яка також впливає на температури експлуатації деталей. Встановлено, що зі збільшенням вмісту вуглецю у сплаві спостерігається зростання температури карбідного ліквідусу t_L та кількості карбідів у складі сплаву (рис. 1). Це призводить до погіршення експлуатаційних та ремонтних властивостей матеріалу внаслідок утворення грубих включень карбідних складових. Слід враховувати вищезазначену особливість та вибирати раціональні межі легування, що лежать у межах 0,1–0,15 % вуглецю.



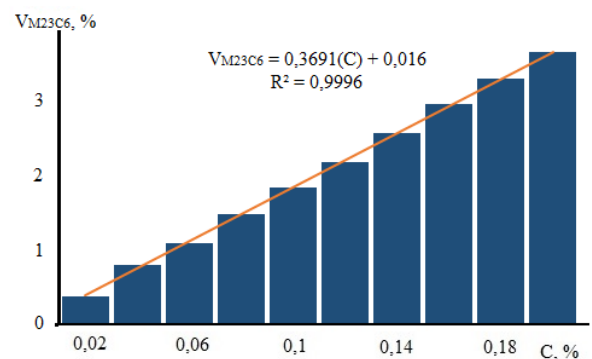
a



б



в



г

Рис. 1. Температурні залежності розчинення (виділення) карбідів типу MC (а) та M23C6(б), а також кількість карбідів MC (в) та M23C6(г) від вмісту вуглецю у складі сплаву

Температура карбідного ліквідусу знижується зі збільшенням вмісту титану в металі (рис. 2а), це з виділенням зміною складу карбїду (рис. 2б). Так, при концентрації титану в сплавї більше 3 %, його кількість починає переважати в карбїді над кількістю ніобію, а при концентрації більше 5,5 % і над кількістю танталу. Перетворення складу карбїдів підпорядковується лінійним законам і описується відповідними математичними залежностями, які у таблиці 1. Зміни складу карбїдів призводить до зміни їх морфології. Карбїди типу TiC виділяються у міждендритних просторах і мають шрифтову форму, яка негативно впливає на властивості сплаву, тому необхідно обмежувати легування та не допускати їх виділення. У досліджуваній композиції вміст титану має бути більше 5,5 %.

Зростання температури карбідного ліквідусу t_L зі збільшенням кількості танталу в металі, пов'язується з утворенням карбїдів TaC вже при концентрації понад 1 % танталу (рис. 3). Перехід карбїду MC у карбїд на основі танталу призводить до збільшення міжатомних зв'язків, що сприяє зростанню температури розчинення (виділення) карбїду. Однак при 2 % танталу у складі з'являється топологічно щільнопакована η -фаза (61,3Ni-15,4Co-13,7Ti-4,8Nb-2,34Ta-2,08Al-0,29Cr), що необхідно враховувати при модернізації сплаву. Так само, при 7 % танталу у сплавї вироджуються карбїди типу $M_{23}C_6$ і це негативно впливає на зернограничну повзучість за температури експлуатації. Введення танталу змінює морфологію карбїду MC на огранену неправильну форму.

Введення у складнолеговану композицію ніобію призводить до зниження температури карбідного ліквідусу при концентрації 2,5–3 % (рис. 4). У цьому діапазоні легування спостерігається поява η - фази, після утворення якої відбувається підвищення t_L , і навіть зміна основи карбїду на NbC. Карбїд ніобію має не високу температуру ліквідус, вона не набагато нижче, ніж карбїду TaC і значно нижче, ніж у TiC, таким чином, потрібно прагнути не до утворення монокарбїдів на основі одного елемента, а до утворення складних карбїдів, в основі яких лежить не один елемент.

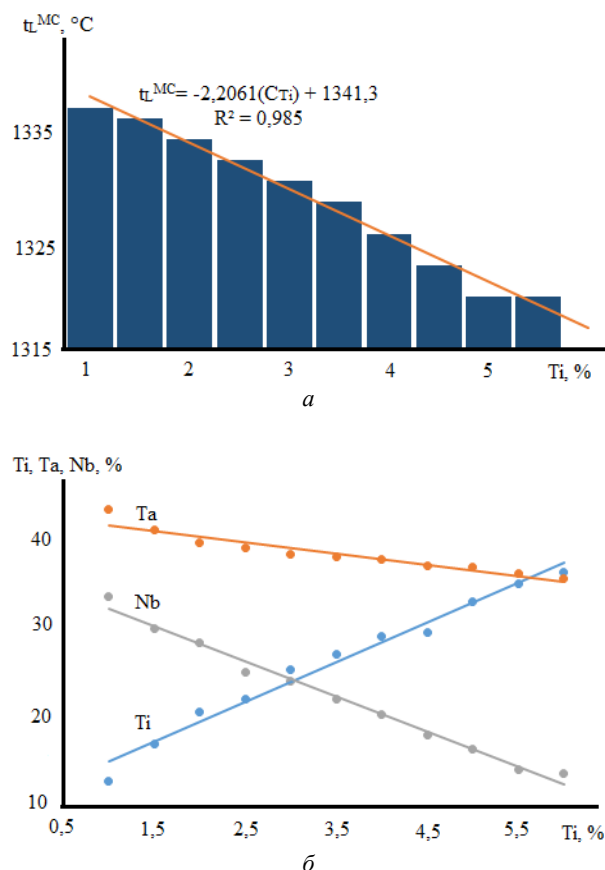


Рис. 2. Температурна залежність розчинення карбїдів типу MC (а) та кількість танталу, титану та вольфраму в MC карбїді (б) від вмісту титану у складі сплаву

Таблиця 1 – Залежності вмісту легувальних елементів у карбїдах від вмісту елементів у сплавї

Легувальний елемент	Залежності вмісту елементів в карбїді, % мас
Ta	$C_{Ta} = -0,7425(C_{Ta} \text{ в сплаві})^2 + 13,919(C_{Ta} \text{ в сплаві}) + 13,708, R^2 = 0,9541;$ $C_{Ti} = 0,388(C_{Ta} \text{ в сплаві})^2 - 7,0591(C_{Ta} \text{ в сплаві}) + 39,156, R^2 = 0,9638;$ $C_{Nb} = 0,2588(C_{Ta} \text{ в сплаві})^2 - 4,7618(C_{Ta} \text{ в сплаві}) + 28,039, R^2 = 0,9552.$
Ti	$C_{Ta} = -1,28(C_{Ti} \text{ в сплаві}) + 42,898, R^2 = 0,899;$ $C_{Ti} = 4,4782(C_{Ti} \text{ в сплаві}) + 10,454, R^2 = 0,9789;$ $C_{Nb} = -3,95(C_{Ti} \text{ в сплаві}) + 36,12, R^2 = 0,988.$
Nb	$C_{Nb} = 13,038(C_{Nb} \text{ в сплаві}) + 6,0995, R^2 = 0,9728;$ $C_{Ta} = -5,253(C_{Nb} \text{ в сплаві}) + 43,374, R^2 = 0,9866;$ $C_{Ti} = -6,8196(C_{Nb} \text{ в сплаві}) + 35,929, R^2 = 0,9619.$
W	$C_{Cr} = 0,1236(C_W \text{ в сплаві})^2 - 2,7352(C_W \text{ в сплаві}) + 84,886,$ $R^2 = 0,9138$ $C_W = -0,1478(C_W \text{ в сплаві})^2 + 3,3042(C_W \text{ в сплаві}) + 2,8098, R^2 = 0,9374$

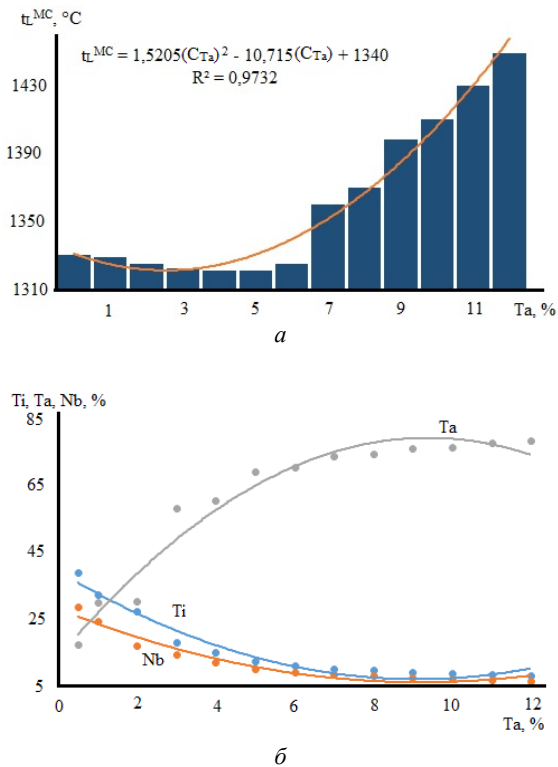


Рис. 3. Температурна залежність розчинення карбідів типу МС (а) та кількості танталу, титану та ніобію в карбіді МС (б) від вмісту танталу в сплаві

Введення у складнолеговану композицію ніобію призводить до зниження температури карбідного ліквідусу при концентрації 2,5–3 % (рис. 4). У цьому діапазоні легування спостерігається поява η -фази, після утворення якої відбувається підвищення t_L , і навіть зміна основи карбиду на NbC. Карбід ніобію має не високу температуру ліквідус, вона не набагато нижче, ніж карбиду TaC і значно нижче, ніж у TiC, таким чином, потрібно прагнути не до утворення монокарбідів на основі одного елемента, а до утворення складних карбідів, в основі яких лежить не один елемент.

Хром є елементом, що впливає на утворення вторинних карбідів, він підвищує температуру розчинення (виділення) карбідів. Встановлено, що карбіди типу $M_{23}C_6$ починають виділятися з твердого розчину при концентрації 17 % хрому (рис. 5), що описується параболічною залежністю. Склад карбідів практично не змінюється зі збільшенням хрому в сплаві і становить 80,5Cr-8,5W-4Co-2Ni. Однак при 31 % Cr у сплаві утворюється фаза ВСС (твердий розчин на основі хрому), який знижує механічні властивості.

Збільшення вольфраму у складі сплаву призводить до зниження температури карбідного ліквідусу при концентрації більше 6 % (рис. 6), така поведінка пов'язана з утворенням σ -фази, кристалічна решітка якої близька до $M_{23}C_6$, із співвідношенням розмірних параметрів $c/0,52 \approx a$ і концентрацією хрому 52 %. Поява зазначеної фази впливає на термодинаміку процесів у сплаві та знижує показники жароміцності матеріалу. Також при перебільшенні 8 %W у сплаві

утворюється μ -фаза, кристалічна решітка якої наближається до M_6C , за схожим механізмом з σ -фазою, що також знижує механічні властивості.

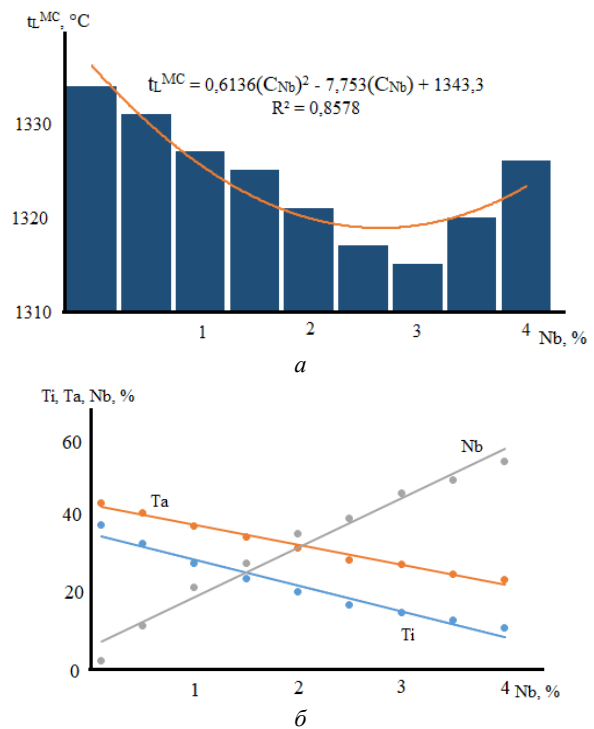


Рис. 4. Температурна залежність розчинення карбідів типу МС (а) та кількості танталу, титану та ніобію в карбіді МС (б) від вмісту ніобію в сплаві

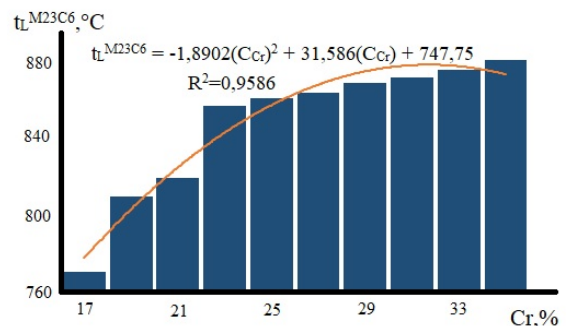


Рис. 5. Температурні залежності розчинення (виділення) карбідів типу $M_{23}C_6$ (б) від вмісту хрому у складі сплаву

Таким чином, отримані дані дають змогу регулювати процесами виділенням фаз завдяки змінам хімічного складу сплаву. Це дає змогу підвищити властивості матеріалу в наслідок усунення негативного впливу первинних карбідів, які не можливо усунути термічною обробкою. Та отримати сприятливу форму і тип вторинних карбідів в структурах жароміцних нікелевих сплавів.

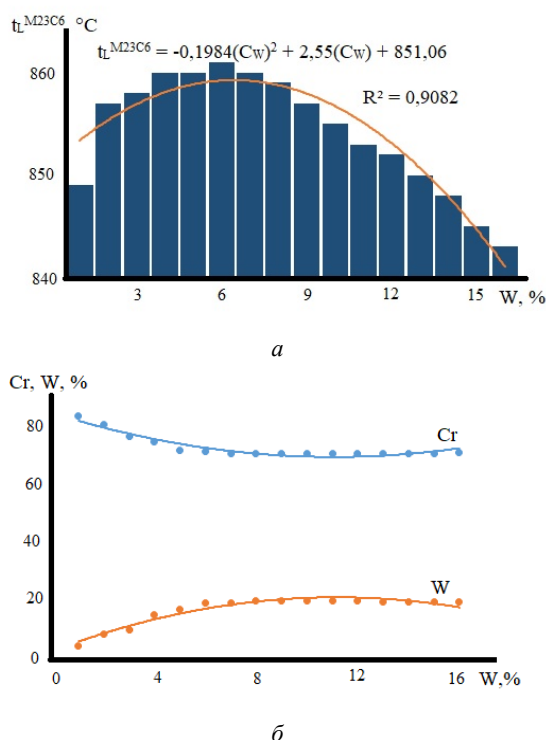


Рис. 6. Температурна залежність розчинення карбідів типу M23C6 (а) та кількості хрому та вольфраму в карбіді M23C6 (б) від вмісту вольфраму в сплаві

Висновки

1. Виходячи з сучасних уявлень про концепцію фазоутворення в жароміцних нікелевих сплавах, карбіди є невід'ємною частиною системи, які впливають на властивості і вимагають коригування складу. Встановлено закономірності впливу хімічного складу сплаву на морфологію та тип карбідів. Показано, що залежно від введених хімічних елементів у системі можуть змінюватись типи карбідів та їх хімічний склад, що призводить до зменшення процесів тріщинотворення у матеріалах.

2. Встановлено математичні залежності, за якими можна визначати температуру ліквідусу карбідів, що дозволяє оптимізувати режими термічної обробки для отримання оптимальної структури сплавів.

3. Встановлено, що при збільшенні концентрації титану більше 5,5 % утворюється η- фаза, а карбіди типу MC набувають шрифтової форми, яка знижує тріщиностійкість матеріалу. Також, η- фаза утворюється при концентрації понад 2 % Ta в сплаві, а вже за 7 % відбувається виродження карбідів типу M₂₃C₆, що негативно впливає на зернограничну повзучість. Введення більше 2,5 % Nb призводить до утворення ТЩП фази та зниження характеристик жароміцності матеріалу.

Список використаної літератури

1. Chao-Nan Wei The effects of carbon content on the microstructure and elevated temperature tensile strength of a nickel-base superalloy / Chao-Nan Wei , Hui-Yun Bor, Li Chang// Materials Science and Engineer-

ing A. – 2010. – Vol. 527. – P. 41–3747. doi:10.1016/j.msea.2010.03.053

2. B. G. Choi MC Carbide Decomposition during Thermal Exposure of Polycrystalline Ni-Base Superalloys / B. G. Choi // Solid State Phenomena. – 2007. – Vol. 124–26. – P. 1505–1508.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.124-126.1505>

3. EBSD study of dissimilar transient liquid phase joining of duplex stainless steel SAF 2205 to nickel-based superalloy IN X-750. Weld World (2021) / Baharzadeh, E., Shamanian, M., Rafiei, M. et al. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01039-2>

4. High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy. Mater Sci 56, 432–440 (2020) / Kvasnytska, Y.H., Ivaskevych, L.M., Balytskyi, O.I. et al. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00447-5>

5. Development of Corrosion and Heat-Resistant Nickel Alloys and their Production Technology with the Aim of Import Substitution. Power Technol Eng 54, 225–231 (2020) / Min P.G., Sidorov V.V., Vadeev V.E. et al. <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01195-x>

6. Mechanistic force modeling in finish face milling of additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy. Int J Adv Manuf Technol 111, 1535–1551 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06222-9>

7. 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. – N 95(4). – P. 237–244. DOI: 10.1080/09500839.2015.1039621

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.

9. O.A. Glotka Distribution of Elements in Carbides of Multicomponent Superalloys, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 42, No. 6: 869–884 (2020) (in Russian) / O. A. Glotka and S. V. Haiduk <https://doi.org/10.15407/mfint.42.06.0869>

10. Coherency strain and precipitation kinetics: Crystalline and amorphous nitride formation in ternary Fe-Ti/Cr/V-Si alloys, Philosophical Magazine 94 (27), 3098-3119, 9, 2014 / B Schwarz, PJ Rossi, L Straßberger, F Jörg, SR Meka, E Bischoff <https://doi.org/10.1080/14786435.2014.952258>

11. Nitriding of iron-based ternary Fe-V-Si alloy: The precipitation process of separate nitrides Acta materialia 76, 394-403 / B Schwarz, SR Meka, RE Schacherl et al. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.05.017

12. Effects of Strain Rate and Temperature on Tensile Properties, Deformation and Dynamic Strain Ageing Behavior of Ni-Base Superalloy Superni 263. INAE Lett 4, 241–250 (2019) Jadav, J., Rajulapati, K.V., Bhanu Sankara Rao, K. et al. <https://doi.org/10.1007/s41403-019-00083-9>

13. Microstructure and homogenization process of as-cast GH4169D alloy for novel turbine disk. Int J Miner

Metall Mater 26, 889–900 (2019) / Chen, K., Rui, Sy., Wang, F. et al. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1802-0>

14. Biroasca S. Crystallographic Orientation Relationship with Geometrically Necessary Dislocation Accumulation During High-Temperature Deformation in RR1000 Nickel-Based Superalloy. Metall Mater Trans A 50, 534–539 (2019) / Biroasca S. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-5036-y>

15. Additive Manufacturing of Powdery Ni-Based Superalloys Mar-M-247 and CM 247 LC in Hybrid Laser Metal Deposition. Metall Mater Trans A 49, 3812–3830 (2018) / Seidel, A., Finaske, T., Straubel, A. et al. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4777-y>

16. Misfit-induced changes of lattice parameters in two-phase systems: coherent/incoherent precipitates in a matrix Mittermeijer Journal of applied crystallography 49 (1), 69-77, 2016 / M Akhlaghi, T Steiner, SR Meka, EJ <https://doi.org/10.1107/S1600576715022608>

17. Dependence of the nitriding rate of ferritic and austenitic substrates on the crystallographic orientation of surface grains; gaseous nitriding of Fe-Cr and Ni-Ti alloys Philosophical Magazine 95 (36), 4143-4160 6, 2015 / M Akhlaghi, M Jung, SR Meka et al. <https://doi.org/10.1080/14786435.2015.1115906>

18. Application of Plasma Spraying as a Precursor in the Synthesis of Oxidation-Resistant Coatings. J Therm Spray Tech 22, 992–1001 (2013) / Ritt P., Lu-Steffes O., Sakidja R. et al. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9947-2>

19. Glotka O. A. Modelling the composition of carbides in nickel-based superalloys of directional crystallization / Glotka O. A. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (2020) 102/1, 5–15.

DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6324>

20. Glotka A.A. Distribution of Alloying Elements in the Structure of Heat-Resistant Nickel Alloys in Secondary Carbides. J Appl Spectrosc 87, 812–819 (2020) / Glotka, A.A., Gaiduk, S.V. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-01075-2>

21. Evaluation of Microstructural Deterioration for a Directionally Solidified Ni-Based Superalloy by X-ray Computed Tomography. J. of Materi Eng and Perform (2021) / Avila-Davila, E.O., Palacios-Pineda, L.M., Canto-Escajadillo, F.O. et al. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05377-6>

22. Transformation Mechanism of ($\gamma + \gamma'$) and the Effect of Cooling Rate on the Final Solidification of U720Li Alloy. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.) 30, 887–894 (2017) / Zhao, GD., Yang, GL., Liu, F. et al. <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0566-7>

23. A Fast-Acting Method for Simulating Precipitation During Heat Treatment of Superalloy 718. Metall Mater Trans A 52, 483–499 (2021) / Semiatin, S.L., Tiley, J.S., Zhang, F. et al. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-06092-6>

24. The Effects of Chemistry Variations in New Nickel-Based Superalloys for Industrial Gas Turbine Applications. Metall Mater Trans A 51, 4902–4921 (2020) / Sulzer, S., Hasselqvist, M., Murakami, H. et al. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05845-7>

25. Role of script MC carbides on the tensile behavior of laser-welded fusion zone in DZ125L/IN718 joints at 650 °C. J Mater Sci 55, 13389–13397 (2020) / Liang, T., Wang, L., Liu, Y. et al. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04931-w>

Одержано 14.05.2022

Glotka O., Greshta V., Ol'shanetskii V. Regularities of influence of chemical composition on morphology and type of carbides in nickel-based superalloy

Purpose. It consists in optimizing the chemical composition and morphology of carbides of the welded nickel-based superalloy by changing the chemical composition, which allows to increase the performance properties of body parts by improving the shape and size of the carbide component.

Methods of research. Process modeling was performed by CALPHAD method. The initial data were the chemical compositions of model alloys with different concentrations of carbide-forming elements. The result of the calculation was the chemical compositions of carbides released in the respective systems. The experimental values were processed by the method of least squares to obtain correlation dependences of the "parameter-property" type and to establish mathematical equations of regression models that optimally describe these dependences.

Results. Regularities of influence of chemical composition of metal on morphology and type of carbides are established. It is shown that depending on the introduced chemical elements in the system, the types of carbides and their chemical composition can change, which leads to a reduction of crack formation processes in the material. It is shown that the change in the composition of the material affects the shape, size and composition of the primary carbides.

Scientific novelty. The established dependences of the multicomponent system Ni-22,5Cr-19Co-1,9Al-3,7Ti-2W-1,4Ta-1Nb-0,15C allow to determine the chemical composition of carbides by the chemical composition of the alloy. This makes it possible to change the types of carbides, their composition and morphology, thereby improving the mechanical properties of the material, first of all the fatigue and heat-resistant characteristics.

Practical value. An effective solution for establishing the structural-phase state of nickel-based superalloys by optimizing their chemical composition, which allowed to improve the performance properties of the material. The established dependences can be used in optimizing the composition of industrial nickel-based superalloys and in the development of new compositions.

Key words: nickel-based superalloys, chemical composition, morphology, carbides, critical temperatures.