

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, ORCID: 0000-0002-3117-2687
- Ольшанецький В. Ю. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: olshanolshan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Беліков С. Б. д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: belikov@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Кононов В. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kononov1705@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0479-1386
- Хвостак В. В. аспірант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: khvostak@ukr.net

НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ОСНОВНИХ КРИТИЧНИХ ТЕМПЕРАТУР ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ РІВНООСНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Мета роботи. Полягає у встановленні закономірностей впливу легувальних елементів на теплофізичні характеристики жароміцних нікелевих сплавів рівноосної кристалізації, що дозволяє оптимізувати процеси виготовлення та термічного оброблення.

Методи дослідження. Експериментальні значення оброблялися математичними методами з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість», що оптимально їх описують. Для експериментально-теоретичних досліджень температурної здатності сформовано робочу вибірку сплавів, що складається з відомих промислових жароміцних нікелевих сплавів для рівноосного лиття вітчизняного та закордонного виробництва.

Отримані результати. Встановлено закономірності впливу хімічного складу жароміцних нікелевих сплавів рівноосної кристалізації на теплофізичні характеристики. Отримані співвідношення, що дозволяють врахувати критерії конкуренції (кооперації) хімічних елементів та отримати діаграми, за допомогою яких можна визначити критичні температури.

Наукова новизна. Раніше отримані і нові співвідношення $K\gamma'$, $K\gamma$, KMC та $KM23C6$ дозволяють врахувати критерії конкуренції (кооперації) хімічних елементів у складі жароміцних нікелевих сплавів рівноосної кристалізації. Завдяки цим співвідношенням отримана діаграма, за допомогою якої можна встановити теплофізичні характеристики жароміцних сплавів.

Практична цінність. Запропоновані ефективні рішення по встановленню основних критичних температур жароміцних сплавів рівноосної кристалізації, що дало змогу оптимізувати температури виробництва, термічної обробки та експлуатації. Отримані розрахункові значення критичних температур мали задовільну збіжність з результатами отриманими диференціально-термічним аналізом.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави рівноосної кристалізації, хімічний склад, діаграма, критичні температури.

Вступ

На сучасному етапі в галузі розробки нових жароміцних матеріалів, використання тільки експериментальних методів досліджень перестає задовольняти вимогам, щодо темпу і якості їх розробки. Підвищення

ефективності наукових досліджень можливо лише завдяки збільшенню частки автоматизованих методик, які дозволяють швидко прогнозувати і об'єктивно оці-

нювати за багатьма критеріями властивості жароміцних матеріалів. У періодичній літературі розрахунок властивостей на основі хімічного складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) розглянуто лише з урахуванням γ' -утворюючих елементів [1–10]. Необхідність дослідження особливостей впливу всіх легувальних елементів на властивості потрібно для збільшення точності прогнозування їхніх характеристик [11–15].

Мета роботи

Встановлення закономірностей впливу легувальних елементів на теплофізичні властивості є актуальною проблемою сучасного матеріалознавства високо-температурних матеріалів.

Матеріал і методика досліджень

Для експериментально-теоретичних досліджень температурної здатності сформовано робочу вибірку сплавів, що складається з відомих промислових ЖНС для рівноосного лиття вітчизняного та закордонного виробництва, таких марок: ЖС6У, ЖС6К, ВЖЛ12У, ВЖЛ12Е, М1900, ІН 100, WAZ16, U500, U700, ЖСЗДК, ЖСЗЛС, ВХ4Л, ЧС88У, ЧС104, RENE77, ІН939, ІН738LC, СМ681, RENE220, NFP1916, ЧС70С, СМ939WELDABLE. Вибірку сплавів було здійснено з позиції різноманітності хімічних складів (систем легування), які за вмістом основних елементів мають широкий діапазон легування.

Отримані значення оброблялися математичними методами з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість» з отриманням рівнянь математичних регресійних моделей, що оптимально описують ці залежності. Залежності мають досить високий критичний коефіцієнт кореляції $R^2 \geq 0,85$.

Результати досліджень та їх обговорення

Однчасна присутність кількох легувальних елементів в складі ливарних жароміцних нікелевих сплавів має більш ефективний вплив на жароміцність, ніж еквівалентна кількість одного елемента. В залежності від впливу на механізм зміцнення ливарних ЖНС, елементи можна класифікувати і розділити на такі основні групи: розчинно-дисперсійні зміцнювачі (Al, Ti, Ta, Hf); твердорозчинні зміцнювачі (Co, Cr, Mo, W, Re); карбідоутворювальні елементи (Ti, Ta, Hf, Nb, V, W, Mo, Cr); мікролегувальні домішки різного типу. Такий поділ є досить умовним, оскільки елементи-зміцнювачі можуть розчинятися не лише в γ -твердому розчині, а і у інтерметалідній γ' -фазі з утворенням сполуки типу $(Ni, Cr)_3(Al, Ti, Mo, W, Nd, Ta)$. Однак, автори вважають, що при дотримуванні такої класифікації створюється більш цілісна картина.

Вважається, що оптимізація властивостей ливарних ЖНС полягає у підвищенні сумарного вмісту γ' -утворювальних елементів, при збалансованому сумарному легуванні твердорозчинними зміцнювачами (однак з припущення, що їх внесок у зміцнення є значно меншим). Згідно термодинамічних позицій залежність властивостей систем у двофазному рівноважному стані ($\gamma+\gamma'$) від концентраційних факторів забезпечують ефект кооперації (конкуренції). Тому, виходячи з вище зазначеного, були виконані відповідні залежності $K\gamma'$ і $K\gamma$, розрахункові значення яких визначають концентраційний масштабний фактор, що припадає на одиничний інтервал довільно вибраних осей. Числові позначення на цих осях враховують як конкуренцію, так і кооперацію різних груп елементів в ливарних ЖНС

стан яких не є рівноважним, і відповідає залежності

$$K_{\gamma'} = 5 \frac{\sum(Al+Ti+Nb+Ta+Hf)}{\sum(Cr+W+Mo+Re+Co+Ru)}, \quad (1)$$

де Al, Ti, Nb, Ta, Hf, Cr, W, Mo, Re, Co, Ru – відповідний вміст елементів в сплаві.

Співвідношення $K\gamma$ використані для визначення температури плавлення ливарних ЖНС, оскільки при цих температурах основним фактором, що впливає на критичну температуру є процес дифузії (швидкість якого залежить від твердорозчинних зміцнювачів). Для оцінки цього процесу були використані співвідношення типу

$$K_{\gamma} = \frac{\sum(Cr+W+Mo+Re+Co+Ru)}{\sum(Al+Ti+Nb+Ta+Hf)}, \quad (2)$$

де Al, Ti, Nb, Ta, Hf, Cr, W, Mo, Re, Co, Ru – відповідний вміст елементів в сплаві, % мас.

Встановлення залежностей між температурами карбідних ліквідусів та хімічним складом сплаву дає можливість збільшити стійкість їхньої карбідної складової. З'ясовано, що до карбідоутворювальних елементів в ливарних ЖНС відносяться Ti, Ta, Hf, Nb, W, Mo та Cr. Так, до елементів, які утворюють карбіди МС-типу відносять Ti, Ta, Hf і Nb, а до елементів, що утворюють $M_{23}C_6$ карбіди – Cr, W та Mo. Звісно, що усі ці елементи повністю 100 % не йдуть на утворення карбідів, оскільки деяка їх частка знаходиться в γ' та γ фазах. Отже зрозуміло, що уся сума цих елементів не дасть достовірної картини. Тому, виходячи з того, що приблизно 2/3 танталу і 1/3 ніобію йде на утворення карбідів МС, враховуючи, що карбіди титану є найпоширенішими в сплавах даного класу, та беручи до уваги конкуренцію і кооперацію хімічних елементів було запропоновано співвідношення

$$K_{MC} = Ti^2 + Hf + \frac{2}{3}Ta + \frac{1}{2}Nb, \quad (3)$$

де Ti, Ta, Hf і Nb – відповідний вміст елементів в сплаві, % мас.

Карбіди типу $M_{23}C_6$ в більшості випадків мають основним елементом хром, однак хром повинен знаходитись в γ твердому розчині для підвищення корозійної стійкості сплавів. Збільшення температури рекристалізації ливарних ЖНС відбувається завдяки введенню вольфраму, який повинен розчинятися в нікелю і таким чином знаходитись в твердому розчині. Враховуючи вище наведене, запропоновано співвідношення для встановлення температури ліквідусу карбідів типу $M_{23}C_6$:

$$K_{M_{23}C_6} = \frac{2}{3}Cr + Mo + \frac{1}{2}W, \quad (4)$$

де Cr, Mo і W – відповідний вміст елементів в сплаві, % мас.

Вище наведені співвідношення 1–4 дають змогу встановити основні теплофізичні властивості ливарних ЖНС без попередніх експериментів методом диференціального термічного аналізу, а також розрахувати ширину температурного інтервалу для ефективного гомогенізуючого відпалу в залежності від вмісту легувальних елементів в сплаві.

Зв'язок температур повного розчинення γ' - фази, локального плавлення евтектики і солідусу разом із запропонованим співвідношенням $K\gamma'$ (рис. 1) адекватно описують регресивні математичні моделі (табл. 1). Підвищення теплофізичних характеристик сплавів зі збільшенням параметра $K\gamma'$ зв'язується зі збільшенням легування сплавів як γ' - утворювальними елементами, так і елементами, що знаходяться в γ - твердому розчині.

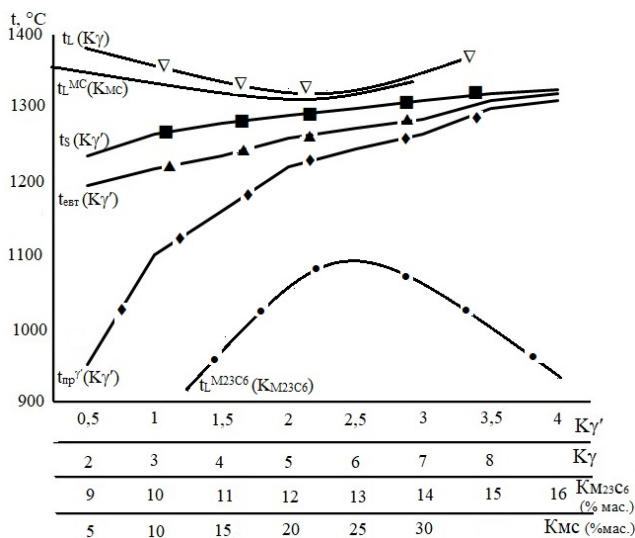


Рисунок 1. Діаграма залежності теплофізичних властивостей від значень структурних K-факторів ливарних ЖНС рівноосної кристалізації

Однак зв'язок співвідношення $K\gamma'$ з температурою ліквідусу є неоднозначним, бо початкова залежність цього фактору мала низький коефіцієнт критичної кореляції ($R^2 \geq 0,1$). Це пояснюється тим, що при температурах, близьких до температури плавлення, в структурі присутній дві фази (рідина і γ -твердий розчин). При цьому температура ліквідусу пов'язана з термодинамічною стабільністю твердого розчину, на яку впливають тугоплавкі елементи, що в ньому знаходяться, вони переважно розчиняються в γ - твердому розчині і істотно підвищують термодинамічну стабільність фаз в ЖНС через низький коефіцієнта дифузії, що призводить до гальмування рухомості атомів в γ - фазі. Тому, після обробки експериментальних даних, і відповідно вище викладеному, і було запропоновано співвідношення $K\gamma$, яке дало можливість достатньо точно визначити температуру ліквідус і температурний інтервал кристалізації ЖНС. На рисунку 1 наведено залежності температури ліквідус і інтервалу кристалізації

від співвідношення $K\gamma$, на яких простежується екстремум в інтервалі значень 4,5...5 $K\gamma$, що відповідає взаємозв'язку γ - утворюючих елементів до γ' - утворюючих у співвідношенні як 5:1. З підвищенням значення $K\gamma$ спостерігається деяке збільшення температури ліквідус, але максимальні значення при цьому не спостерігаються. Протилежна поведінка має місце в інтервалі гомогенізації ЖНС при значеннях $K\gamma > 5$ (при цьому $\Delta t_{кр}$ значно збільшується і досягає майже максимальних значень).

Таблиця 1 – Математичні залежності критичних температур від K-факторів у ЖНС

Критичні температури (за K- факторами)	Математичні залежності
Температура повного розчинення γ' - фази	$t_{np}^{\gamma'} = 150,56 \ln(K\gamma') + 1120,3$ ($R^2=0,88$)
Температура евтектичного перетворення $\gamma+\gamma'$	$t_{sem}^{\gamma+\gamma'} = -5,3757(K\gamma')^2 + 57,694(K\gamma') + 1165,8$ ($R^2=0,87$)
Температурний інтервал гомогенізуючого відпалу	$\Delta t_{гом} = 84,603(K\gamma')^{-1,295}$ ($R^2=0,90$)
Температура солідус	$t_s = 38,458 \ln(K\gamma') + 1265,4$ ($R^2=0,87$)
Температура ліквідус	$t_L = 3,6863(K\gamma')^2 - 38,472(K\gamma') + 1443,6$ ($R^2=0,85$)
Температурний інтервал кристалізації	$\Delta t_{кр} = 5,3508(K\gamma')^2 - 44,467(K\gamma') + 159,7$ ($R^2=0,85$)
Карбідний ліквідус MC	$t_L^{MC} = 0,0677 K_{MC}^2 - 2,928 K_{MC} + 1352$ ($R^2=0,81$)
Карбідний ліквідус $M_{23}C_6$	$t_L^{M_{23}C_6} = 1,4953 K_{M_{23}C_6}^3 - 77,845 K_{M_{23}C_6}^2 + 1265,9 K_{M_{23}C_6} - 5517$ ($R^2=0,87$)

Для сплавів рівноосної кристалізації у певному концентраційному інтервалі побудовані залежності карбідних ліквідусів від отриманих співвідношень K_{MC} та $K_{M_{23}C_6}$ (рис. 1), що враховують вміст карбідоутворюючих елементів в жароміцних сплавах. На цих залежностях спостерігаються екстремуми при $K_{MC} \approx 20$ і $K_{M_{23}C_6} \approx 13$ одиниць, які пояснюються збільшенням титану в карбідах MC-типу і утворенню евтектичних карбідів. А для карбідів типу $M_{23}C_6$ наявність екстремуму можна пояснити максимальним насиченням легувальними елементами.

Отже, використовуючи встановлену діаграму можна оцінити основні критичні температури і ширину інтервалів гомогенізації та кристалізації, що істотно впливають на технологічність сплавів при формуванні бездефектної структури.

Результати встановлення теплофізичних характеристик ЖНС рівноосної кристалізації за допомогою діаграми, в подальшому було порівняно з експериментальними даними, отриманими за допомогою диференціального термічного аналізу (ДТА). Для підтвердження встановлених закономірностей були обрані промислові жароміцні нікелеві сплави, розроблені в Національному університеті «Запорізька політехніка» ЗМІ-3У і ЖСЗЛС-М середнього рівня легування. В

таблиці 2, представлено результати встановлення теплофізичних властивостей сплавів ЗМІ-ЗУ і ЖСЗЛС-М в порівнянні з експериментальними даними.

Таблиця 2 – Порівняння теплофізичних характеристик ливарних ЖНС, встановлених з використанням діаграми та диференціально-термічним методом

Метод отримання результатів	Критичні температури, °C					
	$t_{pp}^{\gamma'}$	$t_{gem}^{\gamma+\gamma'}$	t_S	t_L	Δt_{som}	Δt_{sp}
ЖСЗЛС-М						
Встановлені за діаграмою	107	1200	1281	1349	129	67
Експериментальні значення	107	1202	1280	1348	132	68
ЗМІ-ЗУ						
Встановлені за діаграмою	1160	1233	1260,7	1354,3	72,9	93,6
Експериментальні значення	1165	1235	1255	1350	68	79

З аналізу таблиці 2 видно, що встановлені за діаграмою та експериментальними даними результати мають непогану збіжність, з похибкою, що не перевищує 5°C. Таким чином, отримана діаграма дає можливість встановлювати теплофізичні характеристики, що залежать від системи легування сплаву, як при розробці нових складів ЖНС рівноосної кристалізації, так і при удосконаленні відомих промислових композицій в рамках марочних складів.

Висновки

1. На основі термодинамічного підходу вперше використані співвідношення $K_{\gamma'}$, K_{γ} , K_{MC} та K_{M23C6} за допомогою яких, можна оцінити критерії конкуренції (кооперації) хімічних елементів для багатокомпонентних композицій рівноосних жароміцних нікелевих сплавів.

2. Отримана діаграма для встановлення основних критичних температур жароміцних нікелевих сплавів рівноосної кристалізації з використанням отриманих співвідношень, що показують вплив легувальних елементів на фазові перетворення в сплавах.

3. Встановлено, що отримані залежності K_{γ} до температури ліквідус та інтервалу кристалізації мають параболічний характер з екстремумом в інтервалі значень 4,5...5 K_{γ} , що відповідає взаємозв'язку γ -утворюючих елементів до γ' - утворюючих у співвідношенні 5:1. З підвищенням значення K_{γ} спостерігається деяке збільшення температури ліквідусу, але максимум цього фактору не досягається.

4. Отримані результати показують, що відносини подібної групи елементів практично односпрямовано діють на діаграми рівноваги розглянутих жароміцних сплавів. Задовільний збіг розрахункових та експериментальних результатів дозволяє вважати, що «перетин»

багатовимірних парабол різних гіперповерхонь фазових рівноваг дає можливість отримати бінарний перетин умовних діаграм рівноваги з лініями рівноважних фаз, що відповідають фізичній реальності.

5. Показано перспективний та ефективний напрямок у вирішенні задачі прогнозування термодинамічної стабільності фаз, що впливає на службові характеристики, як при розробці нових жароміцних нікелевих сплавів рівноосної кристалізації, так і при вдосконаленні складів відомих промислових марок.

Список літератури

- Jarosz, K. Mechanistic force modeling in finish face milling of additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy [Text] / K. Jarosz, K.V. Patel, T. Özel // Int J Adv Manuf Technol . – 2020. – Vol. 111, Iss. 1. – P. 1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06222-9>
- Kvasnytska, Y.H. High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy [Text] / Y.H. Kvasnytska, L.M. Ivaskevych, O.I. Balytskyi // Mater Sci . – 2020. – Vol. 56. – P. 432–440. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00447-5>
- Lizi, He. Effect of carbides on the creep properties of a Ni-base superalloy M963 [Text] / He Lizi, X. F. Sun, H. R. Guan // Materials Science and Engineering A. – 2005. – Vol. 397, Iss. 1 – P. 297–304. DOI: 10.1016/j.msea.2005.02.038
- Kitaguchi, H. Microstructure-Property Relationship in Advanced Ni-Based Superalloys [Text] / H. Kitaguchi. – Open access peer-reviewed chapter, 2012. – 210p. DOI: 10.5772/52011
- Balitskii, A.I. Increasing Turbine Hall Safety by Using Fire-Resistant, Hydrogen-Containing Lubricant Cooling Liquid for Rotor Steel Mechanical Treatment [Text] / A.I. Balitskii, M.R. Havrilyuk, V.O. Balitska, V.O. Kolesnikov, L.M. Ivaskevych, // Energies . – 2023. – Vol. 16 – P. 535–553. <https://doi.org/10.3390/en16010535>
- Chen, K. Microstructure and homogenization process of as-cast GH4169D alloy for novel turbine disk [Text] / K. Chen, Sy. Rui, F. Wang, // Int J Miner Metall Mater. – 2019. – Vol. 26 – P. 889–900. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1802-0>
- Akhlaghi, M. 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 [Text] / M. Akhlaghi, M. Jung, SR. Meka, M. Fonović, A. Leineweber, EJ. Mittemeijer // Philosophical Magazine. – 2015. Vol. 95 (36) – P. 4143–4160. <https://doi.org/10.1080/14786435.2015.1115906>
- Avila-Davila, E.O. Evaluation of Microstructural Deterioration for a Directionally Solidified Ni-Based Superalloy by X-ray Computed Tomography [Text] / E.O. Avila-Davila, L.M. Palacios-Pineda, F.O. Canto-Escadajillo // J. of Materi Eng and Perfor. – 2021, - Vol. 30 – P. 727 - 742. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05377-6>
- Zhao, GD. Transformation Mechanism of ($\gamma + \gamma'$) and the Effect of Cooling Rate on the Final Solidification of U720Li Alloy [Text] / GD. Zhao, GL. Yang, F. Liu //

Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). – 2017. – Vol. 30 – P. 887–894. <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0566-7>

10. Ha, J.W. Effects of γ' Precipitation, Dislocation Density, and Grain Size on Stress-Relaxation Properties of INCONEL X-750 Helical Springs / J.W. Ha, B.S. Seong, W. Woo // Metall Mater Trans A. – 2017. – Vol. 48. – P. 3665–3674. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4113-y>

11. Balyts'kyi, O.I. Influence of Lubricating Liquid on the Formation of the Products of Cutting of 38KhN3MFA Steel [Text] / O.I. Balyts'kyi, V.O. Kolesnikov, M.R. Havrylyuk // Mater Sci. – 2019. – Vol. 54 – P. 722–727. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00238-7>

12. Hlotka, A.A. Prediction of the Thermodynamic Processes of Phase Separation in Single-Crystal Refractory Alloys Based on Nickel [Text] / A.A. Hlotka, S.V. Haiduk // Mater Sci. – 2020. – Vol. 55 – P. 878–883. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00382-5>

13. Xiaoming, D. Microstructure of Carbides at Grain Boundaries in Nickel Based Superalloys [Text] / D. Xiaoming, Z. Xiaoli, D. Kui, Z. Yizhou, J. Tao, Y. Hengqiang // Journal of Material Science & Technology. – 2012. – Vol. 28. – P. 1031–1038. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60169-8](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60169-8)

14. Yunrong, Z. Abnormal phases in high w content nickel base superalloys and phase control [Text] / Z. Yunrong, L. Shusuo, Z. Liang, H. Yafang // Superalloys. – 2004. – Vol. 61. – P. 743–751.

15. Hiroto, K. H. Microstructure-Property Relationship in Advanced Ni-Based Superalloys [Text] / K. H. Kitaguchi. - Open access peer-reviewed chapter, 2012. – 210 p.

Одержано 15.02.2023

SCIENTIFIC APPROACHES TO THE OPTIMIZATION OF THE MAIN CRITICAL TEMPERATURES OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS OF EQUAXIAL CRYSTALLIZATION

- Hlotka O. Ph. D., Associate Professor of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: glotka-alexander@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-3117-2687
- Ol'shanetskii V. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: olshanolshan@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Byelikov S. Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: belikov@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Kononov V. Ph. D., Associate Professor of the Department of Engineering Technologies, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: kononov1705@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-0479-1386
- Hvostak V. postgraduate of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: khvostak@ukr.net*

Purpose. It consists in establishing regularities of the influence of alloying elements on the thermophysical characteristics of nickel-based superalloys of equiaxial crystallization, which allows to optimize the manufacturing and heat treatment processes.

Research methods. The experimental values were processed by mathematical methods to obtain correlation dependencies of the “parameter-property” type and establish regression models that optimally describe these dependencies.

Results. The regularities of the influence of the chemical composition of nickel-based superalloys on thermophysical characteristics have been established. We have obtained ratios that allow us to take into account the criteria of competition (cooperation) of chemical elements and obtain diagrams by which it is possible to determine critical temperatures.

Scientific novelty. The established ratios of $K_{\gamma'}$, K_{γ} , K_{MC} and K_{M23C6} allow taking into account the criteria of competition (cooperation) of chemical elements in the chemical composition of nickel-based superalloys of equiaxial crystallization. Thanks to the obtained ratios, a diagram was obtained with the help of which it is possible to establish thermophysical characteristics for the alloys of the specified group.

Practical value. An effective solution for establishing the main critical temperatures of nickel-based superalloys of equiaxial crystallization is proposed, which made it possible to optimize the temperatures of production, heat treatment and operation.

Key words: nickel-based superalloys of equiaxial crystallization, chemical composition, diagram, critical temperatures.

References

1. Jarosz, K., Patel, K.V. & Özel, T. (2020). Mechanistic force modeling in finish face milling of additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy. *Int J Adv Manuf Technol* 111, 1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06222-9>
2. Kvasnytska, Y.H., Ivaskevych, L.M., Balytskyi, O.I. et al. (2020). High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy. *Mater Sci* 56, 432–440. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00447-5>
3. Lizi He, X. F. Sun, H. R. Guan (2005). Effect of carbides on the creep properties of a Ni-base superalloy M963. *Materials Science and Engineering A* 397(1), 297–304. DOI: 10.1016/j.msea.2005.02.038
4. Hiroto Kitaguchi (2012). Microstructure-Property Relationship in Advanced Ni-Based Superalloys. Open access peer-reviewed chapter, 210. DOI: 10.5772/52011
5. Balitskii, A.I.; Havrylyuk, M.R.; Balitska, V.O.; Kolesnikov, V.O.; Ivaskevych, L.M. (2023). Increasing Turbine Hall Safety by Using Fire-Resistant, Hydrogen-Containing Lubricant Cooling Liquid for Rotor Steel Mechanical Treatment. *Energies* 16, 535. <https://doi.org/10.3390/en16010535>
6. Chen, K., Rui, Sy., Wang, F. et al. (2019). Microstructure and homogenization process of as-cast GH4169D alloy for novel turbine disk. *Int J Miner Metall Mater* 26, 889–900. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1802-0>
7. Akhlaghi, M., Jung, M., Meka, SR., Fonović, M., Leineweber, A., Mittemeijer EJ. (2015) 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. <https://doi.org/10.1080/14786435.2015.1115906>
8. Avila-Davila, E.O., Palacios-Pineda, L.M., Canto-Escajadillo, F.O. et al. (2021). Evaluation of Microstructural Deterioration for a Directionally Solidified Ni-Based Superalloy by X-ray Computed Tomography. *J. of Mater Eng and Perform* 30, 727–742. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05377-6>
9. Zhao, GD., Yang, GL., Liu, F. et al. (2017). 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. <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0566-7>
10. Ha, J.W., Seong, B.S., Woo, W. et al. (2017). Effects of γ' Precipitation, Dislocation Density, and Grain Size on Stress-Relaxation Properties of INCONEL X-750 Helical Springs. *Metall Mater Trans A* 48, 3665–3674. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4113-y>
11. Balyts'kyi, O.I., Kolesnikov, V.O., Havrylyuk, M.R. (2019). Influence of Lubricating Liquid on the Formation of the Products of Cutting of 38KhN3MFA Steel. *Mater Sci* 54, 722–727. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00238-7>
12. Hlotka, A.A., Haiduk, S.V. (2020). Prediction of the Thermodynamic Processes of Phase Separation in Single-Crystal Refractory Alloys Based on Nickel. *Mater Sci* 55, 878–883. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00382-5>
13. Xiaoming, D., Xiaoli, Z., Kui, D., Yizhou, Z., Tao, J., Hengqiang Y. (2012). Microstructure of Carbides at Grain Boundaries in Nickel Based Superalloys. *Journal of Material Science & Technology* 28, 1031–1038. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60169-8](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60169-8)
14. Yunrong, Z., Shusuo, L., Liang, Z., Yafang, H. (2004). Abnormal phases in high w content nickel base superalloys and phase control. *Superalloys* 61, 743–751.
15. Hiroto K. (2012). Microstructure-Property Relationship in Advanced Ni-Based Superalloys. Open access peer-reviewed chapter, 210.