

PACS numbers: 06.60.Vz, 61.43.-j, 61.66.Dk, 64.70.D-, 65.40.gh, 81.30.Bx

Визначення технологічних характеристик багатокомпонентних нікелевих стопів розрахунковими методами

С. В. Максимова, В. В. Воронов, П. В. Ковальчук

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

В роботі представлено результати з моделювання температурного інтервалу топлення і фазового складу багатокомпонентних нікелевих стопів, що одержані шляхом застосування метод розрахункового конструювання стопів, а саме методики CALPHAD у поєднанні із статистичним обробленням одержаних результатів. Зокрема, розрахунковим шляхом визначено температури ліквідусу та солідусу для низки експериментальних стопів системи Ni–Cr–Co–Al–(Me). Встановлено ступінь впливу адгезійно-активних елементів (Ti, Nb, Zr) на температуру ліквідусу та фазовий склад стопів даної системи. Визначено орієнтовний вміст легуючих елементів для забезпечення необхідної температури топлення експериментальних припоїв. При цьому показано, що легування стопів Цирконієм суттєво знижує температуру солідусу, значно розширюючи інтервал топлення експериментальних стопів, що пов'язано з формуванням в них низькотемпературної цирконійової евтектики. Вивчено вплив Титану та Ніобію на кількість та термічну стабільність γ' -фази в експериментальних стопах. Досліджено вплив тяжкотопких компонентів (Mo, W, Re) на наявність топологічно щільно-пакованих (ТЩП) фаз. Зазначається, що часткове заміщення Вольфраму Ренієм в експериментальних стопах системи Ni–Cr–Co–Al–(Me) дає змогу значно понизити кількість шкідливих μ - та ρ -фаз.

Corresponding author: Svitlana Vasylyvna Maksymova
E-mail: maksymova.svitlana15@ukr.net

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: S. V. Maksymova, V. V. Voronov, and P. V. Kovalchuk, Determination of Technological Characteristics of Multicomponent Nickel Alloys by Calculation Methods, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 7: 849–860 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.07.0849](https://doi.org/10.15407/mfint.44.07.0849)

Ключові слова: припій, паяння, ливарні жароміцні нікелеві стопи, математичне моделювання (CALPHAD), адгезійно-активні елементи.

The main goal of this work is to determine the melting temperature range and phase composition of multicomponent Ni-based alloys by applying the methods of design of alloys (CALPHAD method) in combination with statistical processing of the results. In particular, the liquidus and solidus temperatures for a number of experimental alloys of the Ni–Cr–Co–Al–(Me) system are calculated. The degree of influence of adhesive-active elements (Ti, Nb, Zr) on the liquidus temperature and phase composition of alloys of this system is established. The approximate content of alloying elements to ensure the required melting point of experimental filler metals is determined. As shown, alloying zirconium significantly reduces the solidus temperature thus significantly expanding the melting range of experimental alloys. This effect is associated with the formation of low-temperature zirconium eutectic. The influence of titanium and niobium on the amount and thermal stability of the γ' -phase in experimental alloys is studied. The influence of refractory components (Mo, W, Re) on the presence of topologically close-packed (TCP) phases is studied. As noted, partial replacement of tungsten by rhenium in experimental Ni–Cr–Co–Al–(Me)-based alloys significantly reduces the amount of harmful μ - and ρ -phases.

Key words: brazing, brazing filler metal, foundry heat-resistant nickel alloys, mathematical modelling (CALPHAD), adhesive-active components.

(Отримано 3 квітня 2022 р.; остаточн. варіант — 2 червня 2022 р.)

1. ВСТУП

Поява нових жароміцних матеріалів, розробка високоефективних схем охолодження деталей і вузлів газотурбінних двигунів (ГТД) вимагають розробки нових припоїв, технологічних режимів паяння і способів нанесення припоїв. Процес паяння був і залишається єдиним універсальним способом з'єднання ливарних нікелевих жароміцних стопів при виготовленні елементів ГТД, а також при їх ремонті, герметизації технологічних отворів, тощо [1, 2]. При цьому ключовим питанням, пов'язаним з технологією паяння жароміцних нікелевих стопів, є поліпшення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей з'єднань [3].

Сучасні ливарні жароміцні нікелеві стопи являють собою складні багатокомпонентні системи, до складу яких може входити до 12–15 легуючих елементів, сукупна дія яких визначає їхні фізико-механічні властивості — тривалу міцність, пластичність, втому, опір окисненню та газовій корозії та ін. [4, 5]. Цілком очевидно, що у такому випадку знайти оптимальний склад для одержання бажаного комплексу властивостей доволі складно, оскільки це потребуватиме значних витрат часу і коштів. Сказане вище справедливо і

при розробці припоїв для паяння жароміцних ніклевих стопів. Сучасні припої для паяння жароміцних ніклевих стопів, як правило, також є складно-легованими стопами, які містять депресанти і елементи, що мають забезпечувати необхідний рівень експлуатаційних характеристик паяних з'єднань [6, 7].

У зв'язку з цим під час розробки припоїв необхідним інструментом стають методи математичного розрахунку, наприклад, CALPHAD, PHACOMP, та ін. [3–7].

Зокрема, концепція методи CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) шляхом прогнозування стабільних фаз, їх складу, а також термодинамічних властивостей в тих областях фазової діаграми, де відсутня експериментальна інформація, дає можливість будувати фазові діаграми [8–13]. Таким чином, метода CALPHAD об'єднує всю експериментальну інформацію про фазові рівноваги в системі і всю термодинамічну інформацію, одержану при проведенні термохімічних і теплофізичних досліджень.

Найбільш повно такий підхід реалізовано в програмному комплексі JMatPro (Java-based Materials Properties) компанії «Sente Software» [14–16]. Даний програмний комплекс призначений для моделювання широкого спектру властивостей багатокомпонентних систем на різній основі (Fe, Al, Ti, Ni, Co та ін.), містить спеціалізовані термодинамічні бази даних для моделювання процесів охолодження (кристалізації) або нагрівання матеріалів [14–16].

Метою даного дослідження є визначення температурного інтервалу топлення і фазового складу багатокомпонентних ніклевих стопів шляхом застосування метод розрахункового конструювання стопів, а саме методики CALPHAD у поєднанні зі статистичним обробленням одержаних результатів.

2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ

Для термодинамічних розрахунків фазового складу експериментальних стопів була використана спеціалізована програма для моделювання властивостей багатокомпонентних криць та стопів JMatPro. Даний програмний комплекс дає змогу здійснювати термодинамічні розрахунки для багатокомпонентних систем, зокрема, на ніклевій основі з визначенням типу, об'ємної частки фаз, що виділяються (γ , γ' , MC, M23C6, M6C, M3B2 та ін.), хемічного складу фаз і температурної області їхнього існування [16].

Термодинамічні розрахунки базуються на оцінці енергетичних функцій Гіббса кожної фази для заданої температури [11, 12].

$$\Delta G = \Delta G_0 + \Delta G_i^m + \Delta G_i^{xs}, \quad (1)$$

де ΔG_0 — вільна енергія фази у чистому вигляді, ΔG_i^m

енергія від змішування компонентів фази, ΔG_i^{xs} — надлишкова вільна енергія від змішування компонентів фази.

Вільну енергію (ΔG_m) для багатокомпонентної системи можна представити рівнянням:

$$\Delta G_m = \sum_i x_i \Delta G_0^i + RT \sum_i x_i \ln x_i + \sum_i \sum_{j>i} x_i x_j \sum_v \Omega_v (x_i - x_j)^v, \quad (2)$$

де x_i — мольна частка компонента i , ΔG_0^i — вільна енергія фази для чистого компонента i , R — універсальна газова константа, T — температура, Ω_v — коефіцієнт взаємодії, що залежить від значення v (на практиці значення v зазвичай не перевищує 2) [12].

Виходячи з необхідності забезпечення високого рівня експлуатаційних характеристик стопу легування базової системи проводили із урахуванням впливу кожного конкретного елемента на властивості жароміцних ніклевих стопів [17]:

- елементи, які забезпечують жаростійкість стопу: Cr, Al,
- елементи, що зміцнюють твердий розчин: Co, Mo, W,
- елементи, які утворюють γ' -фазу: Al, Ti, Nb,
- карбидоутворювальні елементи: Ti, Nb, Zr.

Межі вмісту Алюмінію, Титану та Ніобію в експериментальних стопах були обрані виходячи з міркувань забезпечення жароміцно-

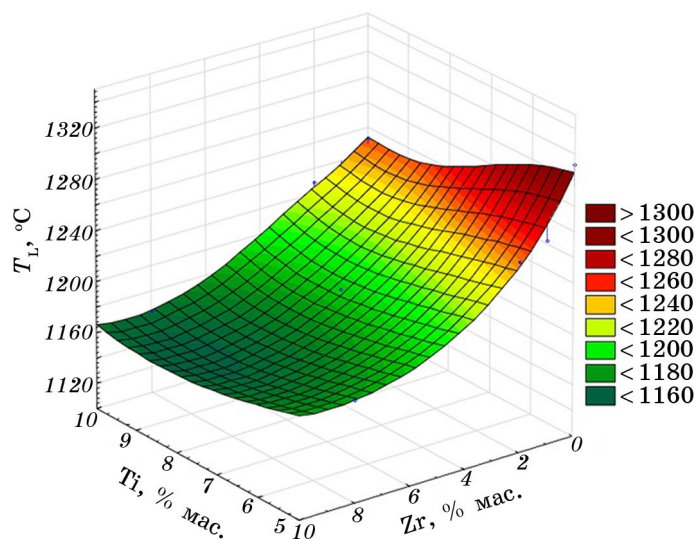


Рис. 1. Ділянка поверхні ліквідусу стопів системи Ni–Cr–Co–Al–Me, в залежності від вмісту Титану та Цирконію, побудована за розрахунковими даними.

Fig. 1. The liquidus surface area of Ni–Cr–Co–Al–Me alloys, depending on the titanium and zirconium content, is based on calculated data.

сти стопу за рахунок утворення необхідної об'ємної частки зміцнювальної γ' -фази $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В процесі проведення досліджень одержано низку значень температур ліквідусу і солідусу, а також фазовий склад експериментальних стопів системи Ni-Cr-Co-Al-Me . Розрахункові дані в подальшому піддавали обробленню методами статистичної аналізи з метою побудови поверхонь ліквідусу, які дали змогу оцінити вплив легуючих елементів на температуру топлення стопів даної системи (рис. 1).

Завдяки одержаним розрахунковим даним встановлено, що зі збільшенням кількості Титану з 5 до 15% мас. у базовому стопі температура ліквідусу знижується з 1360°C до 1253°C (рис. 2, а). При цьому подальше збільшення вмісту Титану у стопі приводить не до пониження температури топлення, а лише до пониження температури солідусу (до 1150°C). В свою чергу, збільшення вмісту Ніобію з 5 до 20% мас. приводить до практично рівномірного пониження температури ліквідусу та солідусу з $1375\text{--}1330^\circ\text{C}$ до $1215\text{--}1150^\circ\text{C}$ (рис. 2, б).

Відомо, що одночасна присутність кількох легувальних елементів-депресантів (таких як Ti , Nb , Zr) може чинити більш ефективний синергетичний вплив на пониження температури топлення,

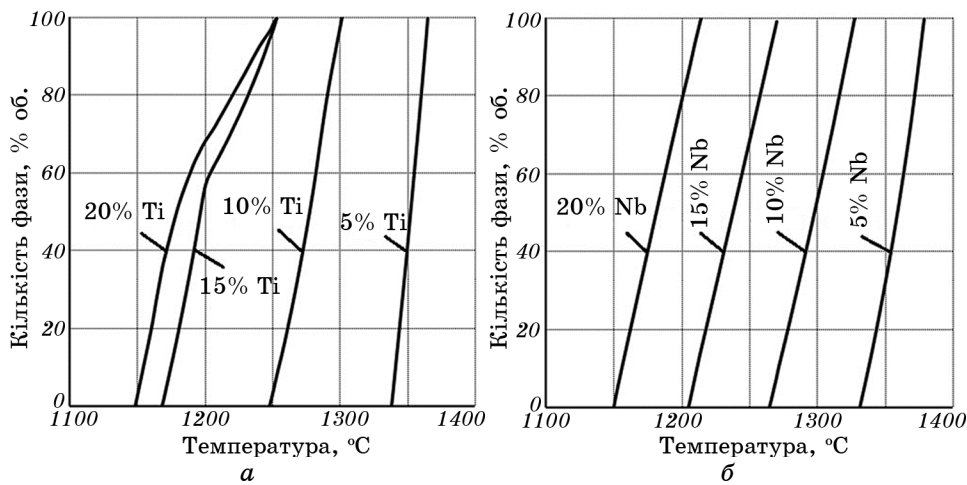


Рис. 2. Залежність інтервалу топлення стопів системи Ni-Cr-Co-Al-Me від вмісту Титану (а) та Ніобію (б).

Fig. 2. Dependence of the melting range of the Ni-Cr-Co-Al-Me -based alloys on the content of titanium (a) and niobium (b).

ніж еквівалентна кількість одного елемента.

Легування стопу одночасно Титаном та Ніобієм у сумарній кількості близько 10% мас. приводить до суттєвого пониження температури ліквідусу та збільшення інтервалу топлення (рис. 3). Для забезпечення необхідної температури топлення припою сумарна кількість даних елементів має знаходитись на рівні 18–20% мас.

Легування базового стопу Цирконієм чинить істотний вплив на температуру топлення стопів системи Ni–Cr–Co–Al–(Me) лише в кількості до 5% мас (рис. 4), після чого інтенсивність впливу на температуру ліквідусу суттєво падає. Введення Цирконію у склад експериментальних стопів суттєво понижуює температуру солідусу — від 1045°C (для стопу, що містить 1% мас. Zr) до 849°C (для стопу, що містить 10% мас. Zr), що значно розширює інтервал топлення експериментальних стопів. Таке пониження температури солідусу пов'язано з формуванням низькотемпературної евтектики, яка містить у своєму складі Цирконій.

Одержані розрахункові дані було підтверджено шляхом вимірювання інтервалів топлення за допомогою диференційної термічної аналізи на установці ВДТА-8М (швидкість нагріву та охолодження складала 40°C/хв.) [18, 19]. Так, зокрема, при дослідженні стопів,

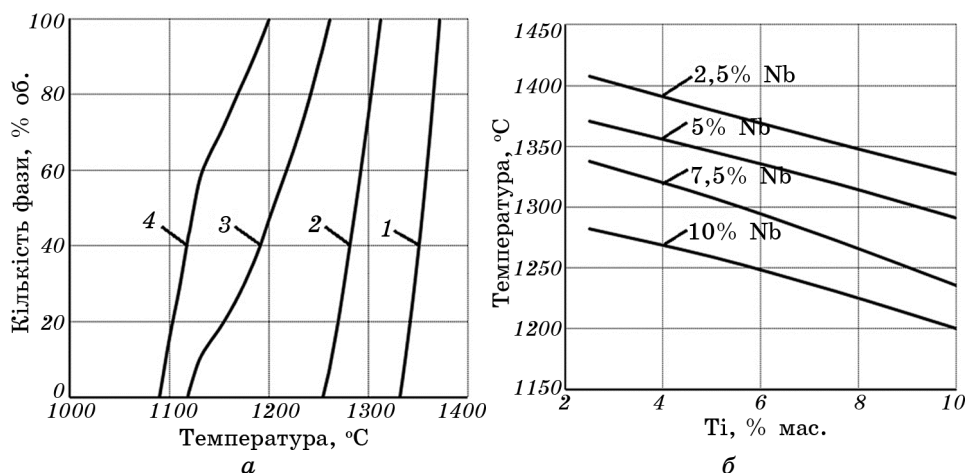


Рис. 3. Залежність інтервалу топлення (а) та температури ліквідусу (б) стопів системи Ni–Cr–Co–Al–Me від вмісту адгезійно-активних компонентів (% мас.): 1 — 2,5% Ti + 2,5% Nb, 2 — 5% Ti + 5% Nb, 3 — 7,5% Ti + 7,5% Nb, 4 — 10% Ti + 10% Nb.

Fig. 3. Dependence of melting range (a) and liquidus temperature (б) of Ni–Cr–Co–Al–Me-based alloys on the content of adhesive-active components (% wt.): 1—2.5% Ti + 2.5% Nb, 2—5% Ti + 5% Nb, 3—7.5% Ti + 7.5% Nb, 4—10% Ti + 10% Nb.

легованих 2% мас. Цирконію встановлено наявність у складі стопів легкотопкої складової на основі інтерметаліду $\text{Ni}(\text{Me})_x\text{Zr}_y$ з температурою топлення 1101–1103°C [19].

Відомо, що забезпечення необхідного рівня роботоздатності ливарних жароміцних ніклевих стопів при підвищених температурах відбувається шляхом зміцнення дрібнодисперсними частками γ' -фази матриці з γ -твердого розчину на основі Ніклю.

Тому, під час дослідження фазового складу стопів окрему увагу зосереджено на вивченні впливу адгезійно-активних елементів на формування зміцнювальної γ' -фази. Дана фаза складається з інтерметаліду Ni_3Al , окрім Алюмінію вона може містити Титан та Ніобій [20].

Зокрема, найбільшу кількість (до 90% об.) і найширший інтервал існування до 1280°C забезпечує введення в стоп 10% мас. Титану (рис. 5). При спільному легуванні 5% мас. $\text{Ti} + 5\%$ мас. Nb спостерігається незначне зменшення кількості зміцнювальної фази (до 85% об.) та пониження температури її розпаду. Слід зазначити, що обидва ці параметри перевищують розрахункові значення для промислового ливарного жароміцного стопу ЖС6У.

Подальше збільшення кількості Ніобію (більше 5% мас.) в стопі приводить до стрімкого зменшення кількості γ' -фази у низькотемпературній області (до 33% об.).

Високі показники стійкості до високотемпературної корозії ли-

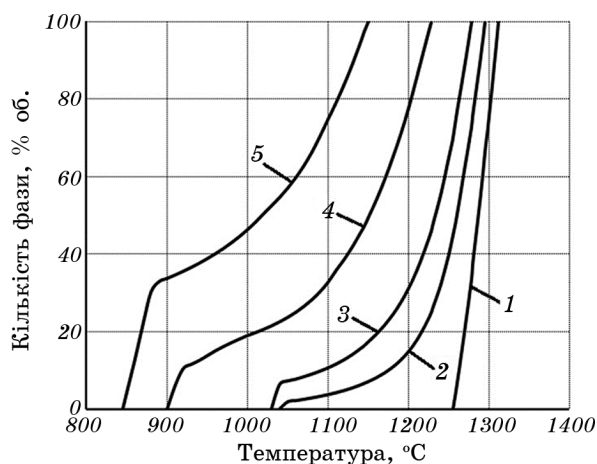


Рис. 4. Залежність інтервалу топлення від легування Цирконієм базового стопу системи Ni-Cr-Co-Al-Me (% мас.): 1 — 0% Zr, 2 — 1% Zr, 3 — 5% Zr, 4 — 10% Zr.

Fig. 4. Dependence of the melting range of the Ni-Cr-Co-Al-Me -based alloy on the zirconium doping (% wt.): 1—0% Zr, 2—1% Zr, 3—5% Zr, 4—10% Zr.

варних ЖНС досягаються переважно завдяки легуванню Хромом. В той же час необхідність підвищення жароміцності викликає необхідність підвищеного легування стопу такими ефективними при високих температурах елементами, як Вольфрам, Молібден та Реній, що при високому вмісті в стопі Хрому приводить до утворення з цими елементами крихких топологічно щільно-пакованих (ТЩП) фаз [17].

В експериментальному стопі системи Ni–Cr–Co–Al–(Me), який містить у своєму складі 2% мас. Мо та 2,5% мас. W фіксується до 12,5% об. σ -фази (рис. 6, а) з температурою повного розчинення близько 1025°C, а також незначна кількість μ - та ρ -фаз.

Збільшення вмісту Вольфраму у стопі до 5% мас. (рис. 6, б) викликає різке збільшення (до 4,5% об.) кількості μ -фази (стабільної до $\sim 700^\circ\text{C}$) та високотемпературної π -фази (з інтервалом існування $\sim 700\text{--}1150^\circ\text{C}$). Дані фази є крихкими та, крім цього, сприяють додатковому локальному накопиченню внутрішніх напружень, що сприяє пониженню механічних характеристик, особливо довготривалої міцності при підвищених температурах.

Часткове заміщення Вольфраму Ренієм (2,5% мас. W + 2,5% мас. Re) дає змогу значно понизити кількість μ -фази і виключити ρ -фазу з діапазону робочих температур ливарних ЖНС (рис. 6, в).

Одержані за допомогою методики CALPAD розрахункові дані в подальшому було використано під час розробки і дослідження низ-

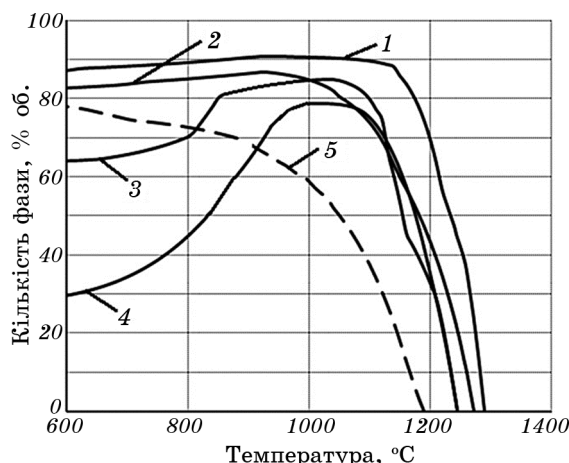


Рис. 5. Залежність об'ємного відсотку γ' -фази від вмісту адгезійно-активних компонентів у стопі (% мас.): 1 — 10% Ti, 2 — 5% Ti + 5% Nb, 3 — 10% Ti + 5% Nb, 4 — 5% Ti + 10% Nb.

Fig. 5. Dependence of the mole percentage of γ' -phase on the content of adhesive-active components in the alloy (% wt.): 1—10% Ti, 2—5% Ti + 5% Nb, 3—10% Ti + 5% Nb, 4—5% Ti + 10% Nb.

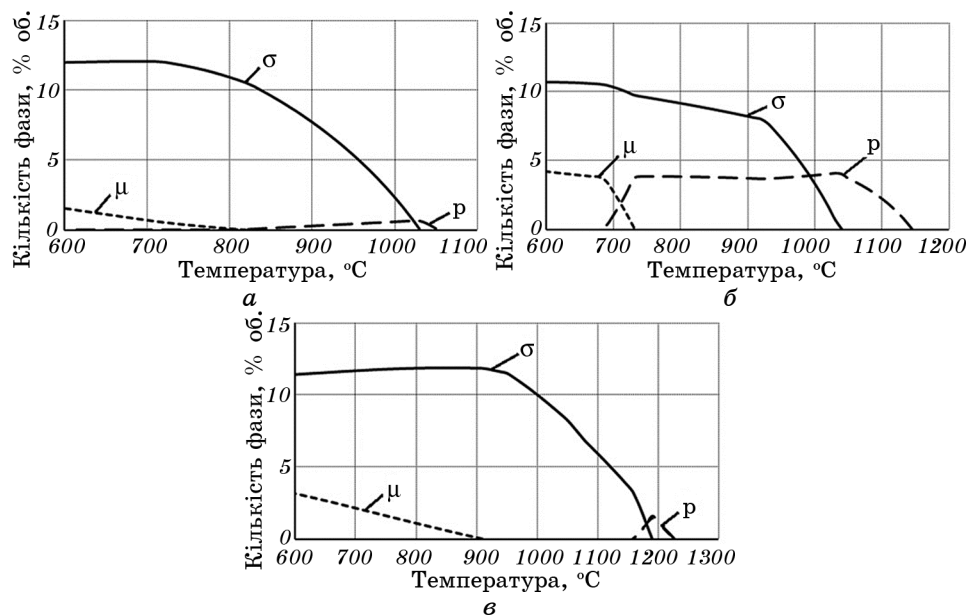


Рис. 6. Залежність об'ємного відсотку ТЦП-фаз у стопі системи Ni–Cr–Co–Me від вмісту важкотопких компонентів (% мас.): 2% Мо + 2,5% W (а), 2% Мо + 5% W (б), 2% Мо + 2,5% W + 2,5% Re (е).

Fig. 6. Dependence of the volume percentage of TCP-phases in Ni–Cr–Co–Me-based alloy on the content of refractory components (% wt.): 2% Mo + 2.5% W (a), 2% Mo + 5% W (б), 2% Mo + 2.5% W + 2.5% Re (е).

ки перспективних припоїв для паяння ливарного жароміцного нікелевого стопу ЖС6У.

4. ВИСНОВКИ

За результатами проведених розрахункових досліджень з використанням програмного пакету JMatPro було встановлено наступне.

Введення в стоп системи Ni–Cr–Co–Al–Me Титану чи Ніобію приводить до пониження температури ліквідусу і солідусу, проте для забезпечення необхідної температури топлення припою їх кількість у припої має сягати понад 20% мас.

Легування стопу одночасно Титаном та Ніобієм у сумарній кількості близько 15% мас. приводить до суттєвого збільшення інтервалу топлення, проте для забезпечення необхідної температури топлення припою сумарна кількість даних елементів має знаходитись у межах 18–20% мас.

Легування базового стопу Цирконієм чинить істотний вплив на

температуру топлення стопів системи Ni–Cr–Co–Al–(Me) лише до 5% мас., після чого інтенсивність впливу на температуру ліквідусу суттєво падає. При цьому легування стопів Цирконієм сприяє зниженню температури солідусу від 1045°C (для стопу, що містить 1% мас. Zr) до 849°C (для стопу, що містить 10% мас. Zr), значно розширюючи інтервал топлення експериментальних стопів, що пов'язано з формуванням низькотемпературної цирконієвої евтектики.

Найбільшу кількість (до 90% об.) і найширший інтервал існування γ' -фази (до 1280°C) забезпечує введення в стоп 10% мас. Титану. При спільному легуванні 5% мас. Ti + 5% мас. Nb спостерігається незначне зменшення кількості даної фази (до 85% об.) та понижуються температура її розпаду.

При дослідженні фазового складу експериментальних стопів встановлено, що збільшення вмісту Вольфраму у стопі до 5% мас. викликає різке збільшення (до 4,5% об.) кількості μ -фази (стабільної до ~700°C) та високотемпературної ρ -фази (з інтервалом існування ~700–1150°C). В свою чергу, часткове заміщення Вольфраму Ренієм (2,5% мас. W + 2,5% мас. Re) дає змогу значно знизити кількість μ -фази і виключити ρ -фазу з діапазону робочих температур ливарних ЖНС.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. В. Квасницький, Г. Ф. Мьяльница, М. В. Матвиенко, Е. А. Бутурля, Д. Чуньлинь, *Автоматическая сварка*, № 8: 22 (2019).
2. А. Г. Евгенов, И. А. Галушка, С. В. Шуртаков, В. А. Игнатов, *Труды ВИАМ*, № 2: 3 (2019).
3. V. Kvasnytskyi, V. Korzhyk, V. Kvasnytskyi, H. Mialnitsa, D. Chunlin, T. Pryadko, M. Matvienko, and Y. Buturlia, *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, No. 6: 6 (2020).
4. В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, Н. А. Попов, *Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов* (Екатеринбург: Издательство Уральского университета: 2016).
5. Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, И. М. Демонис, *Технология легких сплавов*, № 2: 6 (2007).
6. S. H. Zhou, Y. Wang, J. Z. Zhu, T. Wang, L. Q. Chen, R. A. MacKay, and Z. K. Liu, *Superalloys 2004* (Champion: 2004), p. 969.
7. С. В. Гайдук, В. В. Кононов, В. В. Куренкова, *Современная электрометаллургия*, 126, № 1: 44 (2017).
8. N. Saunders, M. Fahrman, and C. J. Small, *Superalloys 2000* (Champion: 2000), p. 803.
9. M. Markl, A. Müller, and N. Ritter, *Metall Mater. Trans. A*, 49: 4134 (2018).
10. W. Huang and Y. A. Chang, *Mater. Sci. Eng. A*, 259: 110 (1999).
11. M. Perrut, *Aerospace Lab.*, No. 9: 1 (2015).
12. N. Saunders, *Superalloys 1996* (Champion: 1996), p. 782.
13. H. L. Lukas, S. G. Fries, and B. Sundman, *Computational Thermodynamics: the*

- Calphad Method* (Cambridge: Cambridge University Press: 2007).
<https://www.senteseoftware.co.uk/jmatpro>.
14. N. Saunders, Z. Guo, X. Li, A. P. Miodownik, and J-Ph. Schillé, *JOM*, **55**, No. 12: 60 (2003).
 15. А. Сидоров, *САПР и графика*, **4**: 66 (2015).
 16. Е. А. Шеин, *Труды ВИАМ*, № 3(39): 10 (2016).
 17. С. В. Максимова, В. В. Воронов, П. В. Ковальчук, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 11: 1539 (2019).
 18. С. В. Максимова, П. В. Ковальчук, В. В. Воронов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **43**, № 8: 1079 (2021).
 19. Г. И. Морозова, *Феномен γ' -фазы в жаропрочных никелевых сплавах* (1992).
 20. R. Darolia, D. F. Lahrman, and R. D. Field, *Superalloys 1988* (Champion: 1988), p. 255.

REFERENCES

1. V. V. Kvasnitskiy, G. F. Myal'nitsa, M. V. Matvienko, E. A. Buturlya, and D. Chun'lin', *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 8: 22 (2019) (in Russian).
2. A. G. Evgenov, I. A. Galushka, S. V. Shurtakov, and V. A. Ignatov, *Trudy VIAM*, No. 2: 3 (2019) (in Russian).
3. V. Kvasnytskyi, V. Korzhyk, V. Kvasnytskyi, H. Mialnitsa, D. Chunlin, T. Pryadko, M. Matvienko, and Y. Buturlia, *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, No. 6: 6 (2020).
4. V. P. Kuznetsov, V. P. Lesnikov, and N. A. Popov, *Struktura i Svoystva Monokristallicheskiikh Zharoprochnykh Nikelevykh Splavov* [Structure and Properties of Single-Crystal Heat-Resistant Nickel Alloys] (Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo Universiteta: 2016) (in Russian).
5. E. N. Kablov, N. V. Petrushin, I. L. Svetlov, and I. M. Demonis, *Tekhnologiya Legkiikh Splavov*, No. 2: 6 (2007) (in Russian).
6. S. H. Zhou, Y. Wang, J. Z. Zhu, T. Wang, L. Q. Chen, R. A. MacKay, and Z. K. Liu, *Superalloys 2004* (Champion: 2004), p. 969.
7. S. V. Gayduk, V. V. Kononov, and V. V. Kurenkova, *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **126**, No. 1: 44 (2017) (in Russian).
8. N. Saunders, M. Fahrman, and C. J. Small, *Superalloys 2000* (Champion: 2000), p. 803.
9. M. Markl, A. Müller, and N. Ritter, *Metall Mater. Trans. A*, **49**: 4134 (2018).
10. W. Huang and Y. A. Chang, *Mater. Sci. Eng. A*, **259**: 110 (1999).
11. M. Perrut, *Aerospace Lab.*, No. 9: 1 (2015).
12. N. Saunders, *Superalloys 1996* (Champion: 1996), p. 782.
13. H. L. Lukas, S. G. Fries, and B. Sundman, *Computational Thermodynamics: the Calphad Method* (Cambridge: Cambridge University Press: 2007).
14. <https://www.senteseoftware.co.uk/jmatpro>.
15. N. Saunders, Z. Guo, X. Li, A. P. Miodownik, and J-Ph. Schillé, *JOM*, **55**, No. 12: 60 (2003).
16. А. Сидоров, *САПР и Графика*, **4**: 66 (2015) (in Russian).
17. Е. А. Шеин, *Труды ВИАМ*, No. 3(39): 10 (2016) (in Russian).
18. S. V. Maksymova, V. V. Voronov, and P. V. Kovalchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 11: 1539 (2019) (in Russian).

19. S. V. Maksymova, P. V. Kovalchuk, and V. V. Voronov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1079 (2021) (in Ukrainian).
20. G. I. Morozova, *Fenomen γ' -Fazy v Zharoprochnykh Nikelevykh Splavakh* [The Phenomenon of γ' -Phase in Heat-Resistant Nickel Alloys] (in Russian) (1992).
21. R. Darolia, D. F. Lahrman, and R. D. Field, *Superalloys 1988* (Champion: 1988), p. 255.