

II ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Канд. техн. наук Глотка О. А., д-р техн. наук Гайдук С. В.

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ІНТЕРВАЛІВ КРИСТАЛІЗАЦІЇ І ГОМОГЕНІЗАЦІЇ В МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВАХ

Мета роботи. Отримання прогнозувальних регресійних моделей, за допомогою яких можна адекватно розраховувати критичні температури для монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС), без проведення попередніх експериментів.

Методи дослідження. Експериментальні значення оброблялися в програмному комплексі Microsoft Office в пакеті EXCEL методом найменших квадратів з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість» з отриманням математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують ці залежності, і побудовою ліній трендів.

Отримані результати. Проведено моделювання температурних характеристик монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів. Наведено співвідношення легувальних елементів і регресійні моделі за допомогою яких можливо прогнозувати ширину температурного інтервалу кристалізації і оптимальну температуру гомогенізації для конкретного сплаву.

Наукова новизна. Вперше запропоновано співвідношення $K_{\gamma'}$ і K_{γ} за допомогою яких можна адекватно прогнозувати температурні характеристики для багатокомпонентних композицій монокристалічних ЖНС. Вперше наведено регресійні моделі для розрахунку критичних температур $t_{n,p}$, t_{em} , t_s і t_L , які дають можливість прогнозувати температурні інтервали кристалізації і гомогенізації.

Практична цінність. Запропоновано ефективне рішення за прогнозування термодинамічної стабільності фаз сплавів, як при розробленні нових складів ЖНС, так і при вдосконаленні відомих промислових марок.

Ключові слова: монокристалічні жароміцні нікелеві сплави, термодинамічні процеси виділення фаз, критичні температури.

Вступ

Одна з ключових проблем сучасного авіаційного двигунобудування – підвищення робочої температури газу. За останні 50 років розвитку реактивної авіації температура газу на вході в турбіну зросла з 1200 К в двигунах другого покоління до 1800–1950 К в двигунах п'ятого покоління. Приблизно 70 % цього приросту було отримано за рахунок вдосконалення систем повітряного охолодження лопаток газових турбін, а 30 % – в результаті підвищення рівня механічних властивостей жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС), що використовуються для лиття монокристалічних лопаток [1].

Пошук оптимального підходу до легування сплавів для монокристалічного лиття здійснювали, використовуючи такі показники:

- зведення до мінімуму дисбалансу системи легування;

- оптимальне співвідношення γ - твердорозчинних зміцнювачів і γ' - утворювальних елементів;

- виключення з системи легування Nb, Hf і V.

При цьому основними фізико-хімічними та структурно-фазовими характеристиками, що визначили вибір найбільш перспективних складів сплавів, стали температури: повного розчинення γ' - фази в матричному γ - твердому розчині $t_{n,p}$ (солвус γ'), локального плавлення нерівноважної евтектики (перитектики) $\gamma + \gamma' t_{em}$, солідусу t_s і ліквідусу t_L . Досягненням максимальних значень цих температур (термодинамічна стабільність фаз) визначається висока температурна працездатність і опір повзучості ЖНС. Слід зазначити, що при прагненні до підвищення критичних температур $t_{n,p}$, t_{em} , t_s і t_L необхідно забезпечити достатній температурний інтервал – $(t_{em} - t_{n,p})$, щоб виключити ризик оплавлення при гомогенізаційному відпаді [2, 3].

В результаті такого емпіричного підходу сучасні ливарні ЖНС для монокристалічного лиття містять понад 10 основних легувальних елементів. У цей час спла-

ви такого класу розробляють за допомогою методів моделювання термодинамічних процесів кристалізації і нагріву, які дозволяють оптимізувати склади з необхідним комплексом властивостей [4, 5].

Мета цієї роботи – отримання прогнозувальних регресійних моделей, за допомогою яких, можна адекватно розраховувати критичні температури для монокристалічних ЖНС, без проведення попередніх експериментів.

Методика проведення досліджень

Для експериментально-теоретичних досліджень температурної працездатності сформована робоча вибірка сплавів, що складається з відомих промислових ЖНС для монокристалічного лиття вітчизняного і зарубіжного виробництва, таких марок: CMSX2, CMSX3, CMSX4, CMSX10, AM1, 203E, TUT92, PWA1484, PWA1480, SRR99, NASAIR100, SMP14, R162, TMS71, TMS75, ReneN4, ReneN5, ReneN6, SC180, MC2, ЖС36, ЖС30М, ЖС40, ЖС 47. Вибірка сплавів була зроблена з позиції різноманітності хімічних складів (систем легування), які за змістом основних елементів мають широкий діапазон легування.

Отримані значення оброблялися в програмному комплексі Microsoft Office в пакеті EXCEL методом найменших квадратів з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість» з отриманням математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують ці залежності і побудовою ліній трендів.

Результати досліджень та їх обговорення

З огляду на те, що жароміцність сплавів значною мірою визначається термодинамічною стабільністю фаз, яку пропонують [2] оцінювати за температурами $t_{n,p}$, $t_{егм}$, t_S і t_L розробка методики розрахунку цих значень від хімічного складу сплаву є актуальним завданням.

Всі компоненти, що використовуються при легуванні ЖНС, можна умовно розділити на три групи: розчиняються головним чином в γ - твердому розчині (Co, Cr, Mo, W, Re); розчиняються переважно в γ' - фазі (Al, Ti, Ta, Hf) і карбідоутворювальні елементи (Ti, Ta, Hf, Nb, V, W, Mo, Cr). Оскільки в монокристалічних сплавах вміст вуглецю зведено до мінімуму, то карбідоутворювальні елементи розподіляються між γ і γ' - фазами. Таким чином поділ легувальних елементів зводиться до двох груп.

З іншого боку, до складу γ' - фази можуть входити багато елементів: Al, Ti, Nb, Cr, Co, Mo, W, V і ін. Але їх вміст в γ' - фазі і вплив на кількість її має різний характер. Цей вплив пов'язаний зі здатністю цього елемента утворювати з нікелем стабільні інтерметалідні фази типу Ni₃Me. Звідси випливає, що на критичні температури сплавів впливають не тільки елементи, які належать до γ' - утворювальних, а й ті, які класифікуються як γ - твердорозчинні зміцнювачі.

В результаті обробки експериментальних даних запропоновано співвідношення

$$K_{\gamma'} = \frac{\Sigma_{\gamma'}(Al + Ti + Nb + Ta + Hf)}{0,2\Sigma_{\gamma'}(Cr + W + Mo + Re + Co + Ru)} \text{ елементів}$$

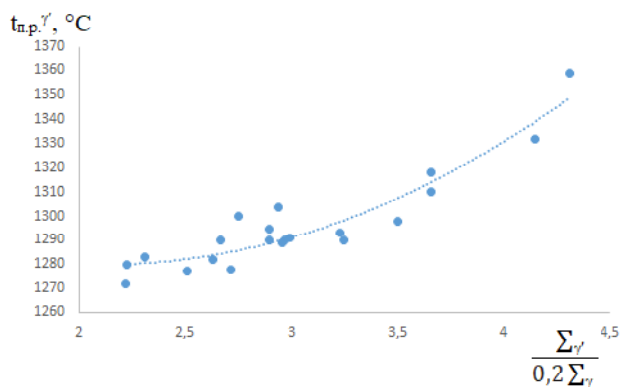
для оцінки термодинамічної стабільності фаз, яке враховує комплексний вплив всіх компонентів сплаву. Таке співвідношення добре корелює з температурами $t_{n,p}$, $t_{егм}$ і t_S , які, в свою чергу, добре корелюють з жароміцністю сплавів. Так, температура повного розчинення має таку залежність від запропонованого співвідношення

$$t_{np}^{\gamma'} = 14,316(\Sigma_{\gamma'} / 0,2\Sigma_{\gamma'})^2 - 60,618(\Sigma_{\gamma'} / 0,2\Sigma_{\gamma'}) + 1344,2$$

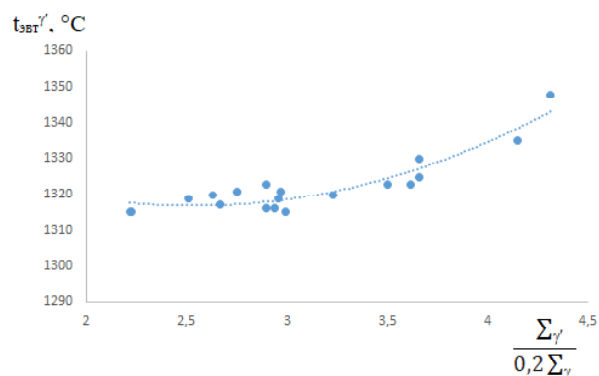
(рис. 1а). Описана залежність може використовуватися як модель з відносною похибкою $\pm 3,46\%$ при визначенні цієї температурної характеристики. Температура евтектичного перетворення так само добре корелює з

$$K_{\gamma'} \text{ (рис. 1б) і має таку залежність}$$

$$t_{егм}^{\gamma'} = 8,3131(\Sigma_{\gamma'} / 0,2\Sigma_{\gamma'})^2 - 42,128(\Sigma_{\gamma'} / 0,2\Sigma_{\gamma'}) + 1370,2;$$



а



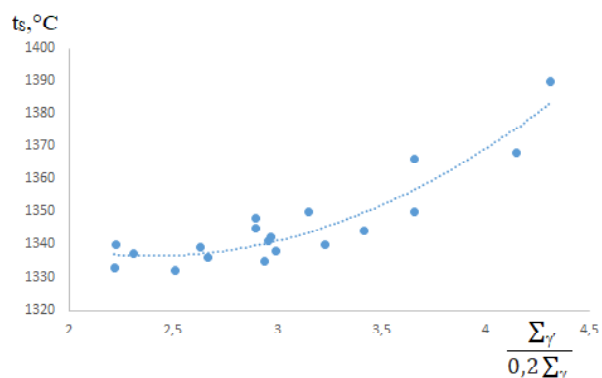
б

Рис. 1. Залежності температури повного розчинення γ' - фази (а) та локального плавлення нерівноважної евтектики (б) від співвідношення легувальних елементів $K_{\gamma'}$ у складі ЖНС

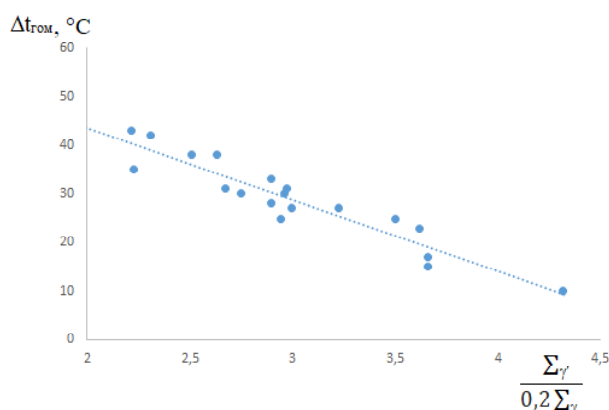
Так само має високий коефіцієнт детермінації ($t_S^{\gamma'} = 12,832(\Sigma_{\gamma'} / 0,2\Sigma_{\gamma'})^2 - 61,611(\Sigma_{\gamma'} / 0,2\Sigma_{\gamma'}) + 1410,4$;

($R^2 = 0,86$) зв'язок температури солідусу із запропонованим співвідношенням $K_{\gamma'}$ (рис. 2а); відносна похибка $\pm 3,74\%$.

Зв'язок температур: повного розчинення γ' - фази, евтектичного перетворення і солідусу із запропонованим співвідношенням адекватно описуються отриманими регресійними моделями. Така поведінка пояснюється тим, що зі збільшенням $K_{\gamma'}$ збільшується легування сплаву, як γ' - утворювальними елементами, так і елементами, що знаходяться в γ - твердому розчині. Це призводить до підвищення критичних температур, а отже, до підвищення теплової структурної стабільності всієї системи.



а



б

Рис. 2. Залежність температури солідусу (а) та інтервалу гомогенізації (б) від співвідношення легуючих елементів $K_{\gamma'}$ в складі ЖНС

Використовуючи вище наведені регресійні моделі, можна з високою точністю прогнозувати критичні температури сплавів без попереднього проведення експериментів методом ДТА. Так само, можна розраховувати ширину температурного інтервалу для ефективного проведення гомогенізуючого відпалу в залежності від вмісту легуючих елементів в сплаві (рис. 2б) $\Delta t_{\text{гом}} = -15,29 (\Sigma_{\gamma'} / 0,2 \Sigma_{\gamma}) + 73,083$ з відносною похибкою $\pm 2,8\%$.

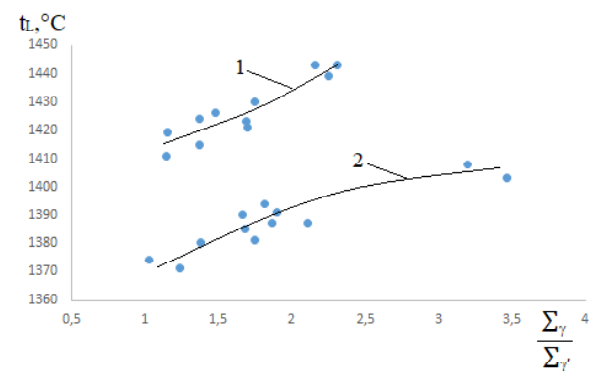
Однак, зв'язок $K_{\gamma'}$ з температурою ліквідусу виявилася неоднозначною. Отримана початкова залежність

давала низький коефіцієнт детермінації ($R^2 = 0,1$).

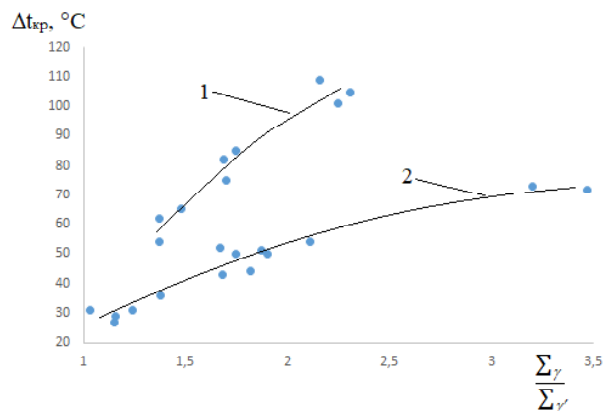
Оскільки при температурах близьких до температури плавлення елементи, які входять до складу γ' - фази і γ - твердого розчину, досліджених ЖНС, переходять в рідину і здійснюють комплексний вплив на величину t_L . Тому в результаті обробки експериментальних даних, авторами було запропоновано співвідношення елементів

$$K_{\gamma} = \frac{\Sigma_{\gamma} (\text{Cr} + \text{W} + \text{Mo} + \text{Re} + \text{Co} + \text{Ru})}{\Sigma_{\gamma} (\text{Al} + \text{Ti} + \text{Nb} + \text{Ta} + \text{Hf})}$$

яке має високу кореляцію з температурою ліквідусу для монокристалічних сплавів (рис. 3а).



а



б

Рис. 3. Залежність температури ліквідусу (а) і інтервалу кристалізації (б) від співвідношення легуючих елементів K_{γ} в складі ЖНС

На рис. 3а чітко простежуються дві залежності. Докладний аналіз дозволив виявити закономірності такого поділу залежностей, яке зводиться до наступного: крива 1 відповідає сплавам другого і третього покоління, в яких кількість титану зводиться до мінімуму і підвищується кількість ренію. Відомо, що реній розчиняється головним чином в γ - твердому розчині і істотно підвищує термодинамічну стабільність фаз в ЖНС за рахунок низького коефіцієнта дифузії, що призводить до гальмування рухливості атомів в γ - фазі.

Це призводить до підвищення температури плавлення сплавів, що містять рений на 50 °С порівняно зі сплавами першого покоління. Співвідношення K_γ для всіх сплавів знаходиться приблизно на тому ж рівні, що пояснюється обмеженням за кількістю введених легувальних елементів у сучасних ЖНС. Для кривої 1 (рис. 3а) залежність температури ліквідус від співвідношення K_γ має такий вигляд:

$t_L = 7,208(\Sigma_\gamma / \Sigma_{\gamma'})^2 - 0,8645(\Sigma_\gamma / \Sigma_{\gamma'}) + 1406,9$, з коефіцієнтом детермінації 0,86; відносна похибка $\pm 3,74\%$.

У монокристалічних сплавах першого покоління головним чином підвищення характеристик жароміцності здійснювалося за рахунок збалансованого вмісту тугоплавких (вольфрам, молібден і танталу) і γ' -утворювальних (алюмінію, титану і танталу) елементів, при одночасному зниженні концентрації хрому та кобальту. Такі тенденції призводять до суттєвих відмінностей у складі γ -фази і, отже, до зміни термодинаміки кристалізації і плавлення металу. Тому було виявлено дві залежності, які з високою точністю обмежують сплави за схемою легування і термодинамічними процесами. Сплави першого покоління мають наступну залежність температури ліквідус від співвідношення K_γ :

$t_L = -3,9843(\Sigma_\gamma / \Sigma_{\gamma'})^2 + 31,908(\Sigma_\gamma / \Sigma_{\gamma'}) + 1342,8$ ($R^2 = 0,85$).

Таким чином, розрахувавши температури солідусу і ліквідусу, за наведеними регресійними моделями, можна прогнозувати ширину температурного інтервалу кристалізації (рис. 3б), що істотно впливає на технологічність сплаву при формуванні бездефектної монокристалічної структури в виливок. Для сплавів 2–3 покоління відповідає крива 1 (рис. 3б) яка має наступну залежність

$\Delta t_{кр} = -50,731(\Sigma_\gamma / \Sigma_{\gamma'})^2 + 241(\Sigma_\gamma / \Sigma_{\gamma'}) - 1891$ з відносною похибкою $\pm 1,4\%$. Сплави першого покоління підпорядковуються наступній математичній моделі

$\Delta t_{кр} = -4,4282(\Sigma_\gamma / \Sigma_{\gamma'})^2 + 38,402(\Sigma_\gamma / \Sigma_{\gamma'}) - 6,4988$ з відносною похибкою $\pm 2,44\%$.

Глотка А.А., Гайдук С.В. Прогнозирование температурных интервалов кристаллизации и гомогенизации в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах

Цель работы. Получение прогнозирующих регрессионных моделей, с помощью которых можно адекватно рассчитывать критические температуры монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС), без проведения предварительных экспериментов.

Методы исследования. Экспериментальные значения обрабатывались в программном комплексе Microsoft Office в пакете EXCEL методом наименьших квадратов с получением корреляционных зависимостей типа «параметр-свойство» с получением математических уравнений регрессионных моделей, которые оптимально описывают эти зависимости, и построением линий трендов.

Полученные результаты. Проведено моделирование температурных характеристик монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов. Приведенные соотношения легирующих элементов и регрессионные модели,

Висновки

1. У роботі проведені дослідження моделюванням термодинамічних процесів виділення фаз у монокристалічних сплавах з різними системами легування.

2. Запропоновані співвідношення $K_{\gamma'}$ і K_γ за допомогою яких можна адекватно прогнозувати температурні характеристики для багатокомпонентних композицій монокристалічних ЖНС.

3. Наведено регресійні моделі для розрахунку критичних температур $t_{n,p}$, $t_{ем}$, $t_{S'}$ і t_L , які дають можливість прогнозувати температурні інтервали кристалізації і гомогенізації.

4. Запропоновано ефективне рішення з прогнозування термодинамічної стабільності фаз сплавів як при розробці нових складів ЖНС, так і при вдосконаленні відомих промислових марок.

Список літератури

1. Рений в жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газовых турбин / [Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Василенко Л. Б. и др.] // *Материаловедение*. – 2000. – № 2. – С. 32–41.
2. Влияние термической обработки на дендритную ликвиацию и жаропрочность монокристаллов интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al , легированных рением / [Поварова К. Б., Базылева О. А., Дроздов А. А. и др.] // *МиТОМ*. – 2018. – № 9. – С. 38–44.
3. Направленная кристаллизация отливок из возвратных отходов сплава ЖС26-ВИ, рафинированных электронно-лучевым переплавом / [Жеманюк П. Д., Клочихин В. В., Лисенко Н. А. и др.] // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2016. – № 1. – С. 40–46.
4. Балицкий О. И. Оцінювання впливу водню на механічні характеристики складнолегованого нікелевого сплаву / Балицкий О. И., Мочульський В. М., Іваськевич Л. М. // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2015. – Т. 51. – № 4. – С. 91–100.
5. Гайдук С. В. Расчет фазового состава литейного свариваемого жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава методом CALPHAD / Гайдук С. В., Кононов В. В. // *Вестник двигателестроения*. – 2016. – № 1. – С. 107–112.

Одержано 21.12.2018

с помощью которых возможно прогнозировать ширину температурного интервала кристаллизации и оптимальную температуру гомогенизации для конкретного сплава.

Научная новизна. Впервые предложены соотношения $K_{\gamma'}$ и K_{γ} , с помощью которых можно адекватно прогнозировать температурные характеристики для многокомпонентных композиций монокристаллических ЖНС. Впервые приведены регрессионные модели для расчета критических температур $t_{n,p}$, t_{opt} , t_S и t_L , которые дают возможность прогнозировать температурные интервалы кристаллизации и гомогенизации.

Практическая ценность. Предложено эффективное решение по прогнозированию термодинамической стабильности фаз сплавов как при разработке новых составов ЖНС, так и при совершенствовании известных промышленных марок.

Ключевые слова: монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы, термодинамические процессы выделения фаз, критические температуры.

Glotka O., Gaiduk S. Forecasting of temperature intervals of crystallization and homogenization in monocrytalline nickel-base superalloy

Purpose. Obtaining predictive regression models with which one can adequately calculate the critical temperatures for monocrytalline nickel-base superalloy without conducting previous experiments.

Methods of research. Experimental values were processed in the Microsoft Office program suite in the EXCEL package with the least squares method, with the obtaining of the “parameter-property” correlation dependencies with the obtaining of mathematical equations of regression models that optimally describe these dependencies and the construction of trend lines.

Results. The simulation of temperature characteristics of monocrytalline nickel-base superalloy is carried out. The ratios of doping elements and regression models are indicated, with the help of which it is possible to predict the width of the temperature interval of crystallization and the optimum temperature of homogenization for an alloy.

Scientific novelty. For the first time, the relations $K_{\gamma'}$ and K_{γ} are proposed, by which one can adequately predict the temperature characteristics for multicomponent compositions of monocrytalline nickel-base superalloys. For the first time, regression models are presented for calculating critical temperatures $t_{n,p}$, t_{opt} , t_S and t_L which enable to predict temperature intervals of crystallization and homogenization.

Practical value. An effective solution is proposed for prediction of thermodynamic stability of alloys phases both in the development of new compositions of nickel-base superalloys, as well as in the improvement of well-known industrial brands.

Key words: monocrytalline nickel-base superalloy, thermodynamic processes of phase separation, critical temperatures.
