

УДК 669.245.018.044:620.193.53

- Глотка О. А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Фізичне матеріалознавство» Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна
e-mail: glotka-alexander@ukr.net;
- Гайдук С. В.** д-р. техн. наук, с.н.с., професор кафедри «Фізичне матеріалознавство» Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна
e-mail: gayduksv@gmail.com;
- Кононов В. В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Технології машинобудування» Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна
e-mail: kononov@gmail.com

ВПЛИВ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ ТА РОЗМІРНОЇ НЕВІДПОВІДНОСТІ КРИСТАЛІЧНИХ ҐРАТОК γ - ТА γ' - ФАЗ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Мета роботи. Отримання прогнозуючих регресійних моделей, за допомогою яких можна адекватно розраховувати механічні властивості монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів, без проведення попередніх експериментів.

Методи дослідження. Для експериментально-теоретичних досліджень температурної працездатності сформована робоча вибірка сплавів, що складається з відомих промислових жароміцних нікелевих сплавів для монокристалічного лиття вітчизняного і зарубіжного виробництва, які за вмістом основних елементів охоплюють 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 (ліній трендів), які оптимально описують ці залежності.

Отримані результати. В роботі розглянуто вплив легувальних елементів на схильність їх до утворення фаз в ливарних жароміцних нікелевих сплавах. На основі впливу елементів на фазоутворення було вперше розроблено коефіцієнт співвідношення легувальних елементів K_{γ} в сплавах даного класу.

Виявлено тісну кореляційну залежність співвідношення K_{γ} з розмірною невідповідністю кристалічних ґраток γ - та γ' - фаз (місфіт). Також показано, що для багатоконпонентних нікелевих систем можна з високою вірогідністю прогнозувати місфіт, який істотно впливає на характеристики міцності сплавів даного класу.

Наведено регресійні моделі кореляційних залежностей від розмірної невідповідності (γ/γ' - місфіта), які дають можливість прогнозувати границі короткочасної і тривалої міцності сплавів. Показано, що величина місфіта при температурі експлуатації повинна прагнути до нуля. Це забезпечить підвищення структурної стабільності за рахунок зведення до мінімуму структурних напружень, що робить позитивний вплив на міцність і пластичні характеристики.

Наукова новизна. В роботі вперше запропоновано коефіцієнт співвідношення легувальних елементів, K_{γ} , який має тісний кореляційний зв'язок з характеристиками міцності та розмірної невідповідності ливарних жароміцних нікелевих сплавів.

Практична цінність. Показано перспективний і ефективний напрямок у вирішенні задачі прогнозування основних характеристик, що впливають на комплекс службових властивостей сплавів як при розробці нових монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів, так і при вдосконаленні складів відомих промислових марок даного класу.

Ключові слова: математичне моделювання; ливарні жароміцні нікелеві сплави; розмірна невідповідність кристалічних ґраток (місфіт); короткочасна та довготривала міцність; співвідношення легувальних елементів.

ВСТУП

Найбільш відповідальними деталями газотурбінних двигунів (ГТД) є лопатки газової турбіни, що визначають максимальну температуру робочого газу на вході в турбіну, питому потужність,

економічність і ресурс двигуна. Одним із шляхів вирішення завдання підвищення робочої температури газу перед турбіною (до 2000...2200 К в перспективних двигунах) є застосування в турбіні лопаток з монокристалічною структурою з ли-

варних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) нового покоління.

1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПУБЛІКАЦІЙ

Основна перевага монокристалічних лопаток, в порівнянні зі звичайними полікристалічними ЖНС, полягає в більш високому опорі високотемпературної повзучості, обумовленому відсутністю в сплаві границь зерен, оскільки їх структура сформована гілками одного дендрита, що розвинувся від монокристалічної затравки [1–3].

На мікроскопічному рівні структура монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів представлена тільки двома фазами: частинками γ' -фази, розсіяними в матриці із складнолегованого γ -твердого розчину на нікелевій основі [4, 5]. У свою чергу частки інтерметалідної γ' - фази розрізняються розмірами і складаються з кубічних мікрочастинок, які розділені нанопрошарками γ - фази.

Зміцнення γ' - фазою забезпечує тривале збереження високотемпературної працездатності сплавів даного класу в широкому інтервалі температур, аж до 1150 °С [6]. Отже, найважливіша роль в опорі високотемпературної повзучості монокристалічних ЖНС належить таким структурно-фазовим характеристикам, як період кристалічних ґраток γ - і γ' - фаз і їх розмірна невідповідність або γ/γ' - місфіт, який розраховується за формулою $\delta = 2((a_{\gamma'} - a_{\gamma}) / (a_{\gamma} + a_{\gamma'}))100\%$, де a_{γ} і $a_{\gamma'}$ – періоди ґраток γ - і γ' - фаз, відповідно [4, 7, 8].

Експериментально встановлено, що вплив леґуючих елементів на період кристалічних ґраток γ' - фази слабкіше, ніж γ - твердого розчину в багатокомпонентних жароміцних сплавах на основі нікелю. Місфіт γ/γ' визначається, головним чином, тими леґуючими елементами, які найбільш сильно збільшують період ґраток γ - твердого розчину. Такими елементами, в порядку зростання впливу на період ґраток γ - фази, є Ru, Re, Mo, W, Nb і Ta [9, 10].

2 МЕТА РОБОТИ

Мета даної роботи – отримання прогнозуючих регресійних моделей, за допомогою яких, можна адекватно розраховувати механічні властивості монокристалічних ЖНС, без проведення попередніх експериментів.

3 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для експериментально-теоретичних досліджень температурної працездатності, сформована робоча вибірка сплавів, що складається з відомих промислових ЖНС для монокристалічного лиття вітчизняного і зарубіжного виробництва, наступ-

них 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 леґування), які за змістом основних елементів охоплюють широкий діапазон леґування.

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 (ліній трендів), які оптимально описують ці залежності.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Враховуючи, що роль в опорі високотемпературної повзучості монокристалічних ЖНС належить такому структурному параметру, як розмірна невідповідність (γ/γ' -місфіт), яке залежить від системи леґування, то актуальним стоїть завдання – отримання оптимальної регресійної моделі для розрахунку даної характеристики на основі хімічного складу сплавів класу монокристалічних ЖНС.

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

З іншого боку, до складу γ' - фази входять багато елементів: Al, Ti, Nb, Cr, Co, Mo, W, V і ін. Але їх вміст в γ' - фазі і вплив на її кількість в структурі, має суттєві відмінності. Цей вплив пов'язаний зі здатністю елементів утворювати з нікелем стабільні інтерметалідні фази типу Ni_3Me . Звідси випливає, що на місфіт і механічні властивості сплавів впливають не тільки елементи, які відносяться до γ' - утворюючих, а й ті, які класифікуються як твердорозчинні зміцнювачі.

В результаті аналізу і обробки експериментальних даних запропоновано співвідношення леґуючих елементів

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

(калібрувальний коефіцієнт 0,2 було визначено емпіричним шляхом) для оцінки механічних властивостей, яке враховує комплексний вплив основних компонентів сплаву. Оскільки розмірна

невідповідність параметрів ґраток пов'язана зі ступенем концентраційного твердорозчинного зміцнення γ - і γ' - фаз, ефективністю дисперсійного зміцнення сплаву, швидкістю повзучості і іншими властивостями монокристалів, то співвідношення K дозволяє зв'язати ці властивості з багатокомпонентними системами.

Встановлено, що розмірна невідповідність має експонентну залежність (рис. 1а) із запропонованим співвідношенням: $\delta = 0,0045 \text{ EXP}(1,6775 K)$; відносна похибка 3,32 %. Збільшення співвідношення K призводить до підвищення (δ), що пов'язується зі зменшенням кількості γ - розчинних зміцнювачів і збільшенням γ' - утворювальних елементів, які впливають на параметри кристалічних ґраток фаз. Показано, що для багатокомпонентних нікелевих систем (монокристалічних ЖНС) можна з високою вірогідністю прогнозувати місфіт, який істотно впливає на характеристики міцності сплавів даного класу.

Встановлено, що залежність межі (σ_B) короткочасної міцності сплавів від величини місфіта (рис. 1б) оптимально описується логарифмічною залежністю: $\sigma_B = -52,32 \ln(\delta) + 1179,9$ з відносною похибкою 3,74 %. Для монокристалічних ЖНС збільшення значення місфіта супроводжується зниженням границі їх короткочасної міцності, оскільки між кристалічними ґратками γ - і γ' - фази утворюються значні напруження, які сприяють процесам структурної та фазової нестабільності, що призводить до передчасного руйнування матеріалу. Показано, що при температурі випробувань 1000 °С, залежність меж 100- і 1000-годинних границь тривалої міцності від величини місфіта (рис. 1в, з) оптимально описується отриманими моделями:

$\sigma_{100}^{1000} = 587,7 \delta^2 + 347,96 \sigma + 269,65$ з відносною похибкою 3,46 % (рис. 1в); $\sigma_{100}^{1000} = 561,4 \sigma^2 + 276,64 \sigma + 174,65$ з відносною похибкою 3,6 % (рис. 1з). Ці залежності показують, що при температурі 1000 °С, значення розмірної невідповідності близько до нуля, сплави мають кращі показники тривалої міцності. Виходячи з вище розглянутих залежностей, можна зробити висновок, що при розробці нових сплавів або вдосконаленні складів відомих промислових марок даного класу, потрібно закладати високі значення місфіта при кімнатній температурі (рис. 1б). Це пов'язано з тим, що з підвищенням температури розмірна невідповідність параметрів ґраток γ - і γ' - фаз змінюється і при температурі експлуатації величина місфіта наближається до нуля (рис. 1в, з), що знизить когерентні напруження і забезпечить поліпшення структурно-фазової стабільності, а, отже, підвищиться тривала міцність.

Встановлено, що запропоноване співвідношення $K_{\gamma'}$ має тісну кореляцію з межами короткочасної (σ_B) і тривалої (σ_{100}^t , σ_{1000}^t) міцності, а також з об'ємною часткою γ' - фази в монокристалічних ЖНС (рис. 2). Всі ці залежності мають лінійний характер з позитивним кутовим коефіцієнтом і похибкою не більше 3,8 %. Така

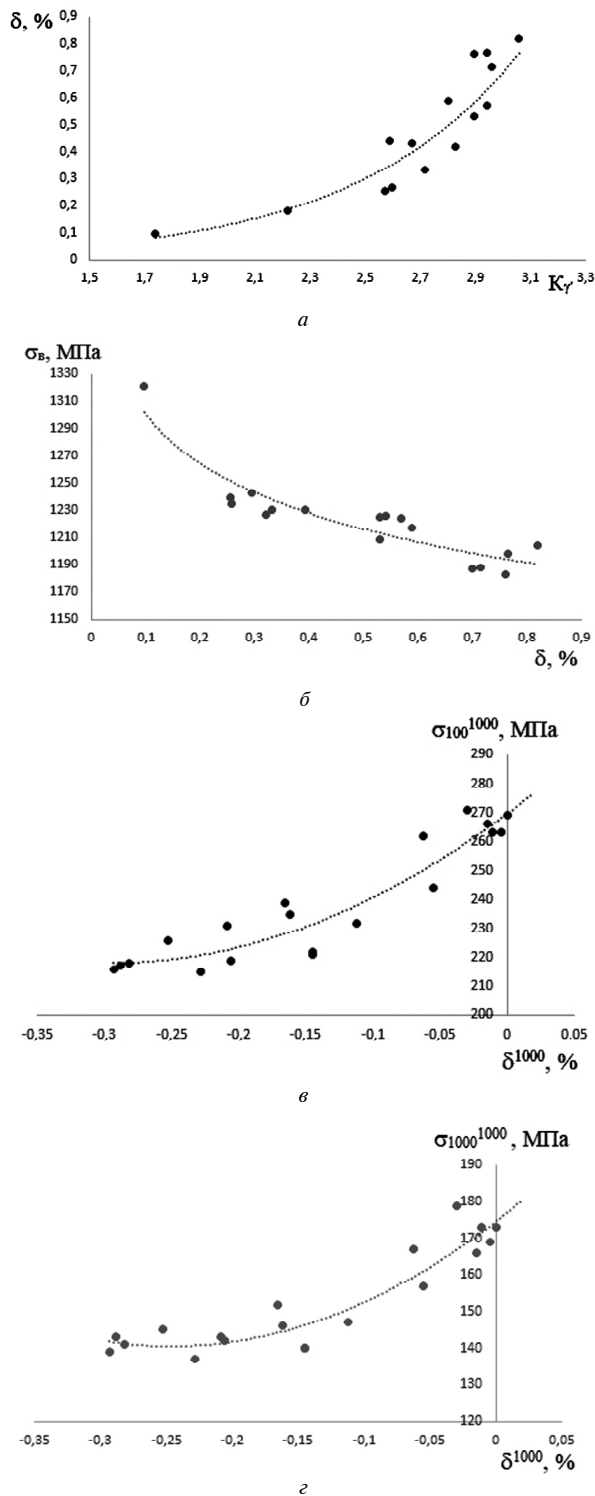
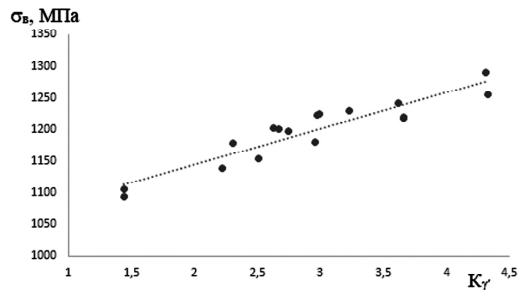


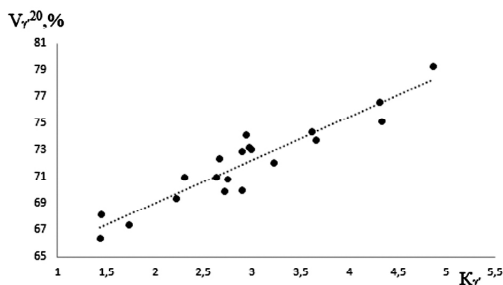
Рисунок 1. Кореляційна залежність властивостей монокристалічних ЖНС від величини місфіта (δ) і співвідношення $K_{\gamma'}$ в їх складі:

a – залежність місфіта (δ) від величини співвідношення $K_{\gamma'}$; *б* – залежність межі короткочасної міцності (σ_B) від місфіта (δ) при 20 °С; (*в*, *з*) – залежність меж 100- і 1000-годинної тривалої міцності від місфіта при 1000 °С

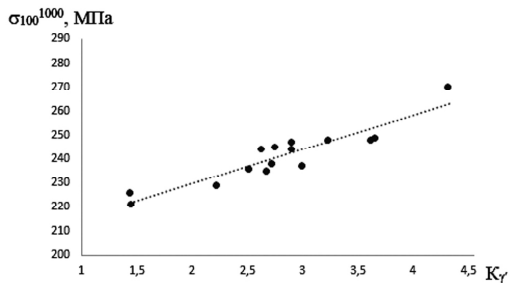
поведінка, пояснюється тим, що зі збільшенням $K_{\gamma'}$ збільшується об'ємна кількість основної зміцнюючої γ' - фази при кімнатній температурі (рис. 2б), і залишкової при підвищених температурах (рис. 2е), а отже підвищується границя короткочасної (рис. 2а) і тривалої міцності (рис. 2в) у монокристалічних сплавах.



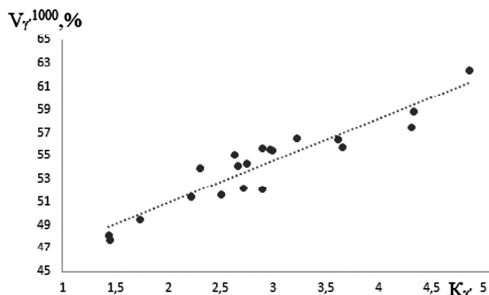
а



б



в



г

Рисунок 2. Залежність межі короткочасної міцності (а), об'ємної кількості γ' - фази при 20 °С (б), границь довготривалої міцності (в) і залишкової кількості γ' - фази при 1000 °С (г) від співвідношення $K_{\gamma'}$ в складі монокристалічних ЖНС

Зв'язок об'ємної частки ($V_{\gamma'}^t$) γ' - фази з границями короткочасної і тривалої міцності із запропонованим співвідношенням К для класу монокристалічних ЖНС адекватно описується отриманими регресійними моделями:

$$\sigma_B = 57,414 K_{\gamma'} + 1030,1;$$

$$V_{\gamma'}^{20} = 3,2607 K_{\gamma'} + 62,481;$$

$$\sigma_{100}^{1000} = 14,303 K_{\gamma'} + 201,11;$$

$$V_{\gamma'}^{1000} = 3,6597 K_{\gamma'} + 43,551.$$

Таким чином, отримані моделі можуть застосовуватися для розрахунків при прогнозуванні механічних властивостей багатокомпонентних нікелевих систем (монокристалічних ЖНС) на основі їх хімічного складу.

ВИСНОВКИ

1. У даній роботі представлені дослідження, проведені моделюванням термодинамічних процесів виділення фаз і їх зв'язок з характеристиками міцності для монокристалічних нікелевих сплавів з різними системами легування.

2. На основі емпіричного підходу отримано нове співвідношення $K_{\gamma'}$ за величиною якого можна адекватно прогнозувати розмірну невідповідність (γ/γ' - місфіт), границю короткочасної міцності (σ_B), об'ємну кількість ($V_{\gamma'}^t$) γ' - фази в структурі, а також межі 100- і 1000- годинної тривалої міцності (σ_{100}^t , σ_{1000}^t) для багатокомпонентних композицій монокристалічних ЖНС.

3. Наведено регресійні моделі кореляційних залежностей від розмірної невідповідності (γ/γ' - місфіта), які дають можливість прогнозувати границі короткочасної і тривалої міцності сплавів. Показано, що величина місфіта при температурі експлуатації повинна прагнути до нуля. Це забезпечить підвищення структурної стабільності за рахунок зведення до мінімуму структурних напружень, що робить позитивний вплив на міцність і пластичні характеристики ЖНС.

4. Показано перспективний і ефективний напрям у вирішенні задачі прогнозування основних характеристик, що впливають на комплекс службових властивостей сплавів як при розробці нових монокристалічних ЖНС, так і при вдосконаленні складів відомих промислових марок даного класу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Philipp Hallensleben On Crystal Mosaicity in Single Crystal Ni-Based Superalloys / Philipp Hallensleben , Felicitas Scholz , Pascal Thome //

- Crystals. – 2019. – № 9. – P. 155–164. DOI:10.3390/cryst9030149.
- Оспенникова О. Г. Создание нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей – залог успешного развития отечественного двигателестроения / Оспенникова О. Г. // *Металлургия машиностроения*. – 2017. – № 4. – С. 17–20.
 - Киселев Ф. Д. Исследование структуры материала рабочих лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации / Киселев Ф. Д. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2018. – № 2. – С. 28–37.
 - Размерное несоответствие периодов кристаллических решеток γ - и γ' - фаз в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов / Протасова Н. А., Светлов И. Л., Бронфин М. Б. и др. // *Физика металлов и металловедение*. – 2008. – № 5. – С. 512–519.
 - P. Caron Evolution of Ni-based Superalloys for Single Crystal Gas Turbine Blade Applications / P. Caron and T. Khan // *Aerospace Science and Technology*. – 1999. – № 3 (8). – P. 513–523. DOI: 10.1016/S1270-9638(99)00108-X
 - Объемное нанофазное упрочнение в монокристаллическом никелевом сплаве ЖС36-ВИ [001] после высокотемпературных выдержек / Кузнецов В. П., Лесников В. П., Конеева И. П. и др. // *МиТОМ*. – 2014. – № 4. – С. 3–6.
 - G. Eggeler On Shear Testing of Single Crystal Ni-Base Superalloys / G. Eggeler, N. Wiczorek, F. Fox // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2018. – N 49. – P. 3951–3962. DOI:10.1007/s11661-018-4726-9.
 - X Wu On the nucleation of planar faults during low temperature and high stress creep of single crystal Ni-base superalloys / X Wu, A Dlouhy, YM Eggeler // *Acta Materialia*. – 2018. – N 144. – P. 642–655.
 - G Laplanche On the influence of crystallography and dendritic microstructure on micro shear behavior of single crystal Ni-based superalloys / G Laplanche, N Wiczorek, F Fox // *Acta Materialia*. – 2018. – №160. – P. 173–184.
 - E. Vacchieri Creep-fatigue interactions in equiaxed and single crystal Ni-base superalloys / E. Vacchieri, A. Costa, A. Riva // *EUROSUPERALLOYS 2014 – 2nd European Symposium on Superalloys and their Applications*. – 2014. – N 14. – 6 p. DOI:10.1051/mateconf/20141419002

Статья поступила в редакцию 27.05.2019

- Глотка А. А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Физическое материаловедение» Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: glotka-alexander@ukr.net;
- Гайдук С. В.** д-р техн. наук, с.н.с., профессор кафедры Физическое материаловедение» Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: gaydukstv@gmail.com;
- Кононов В. В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технологии машиностроения» Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: kononov@gmail.com

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ И РАЗМЕРНОГО НЕСООТВЕТСТВИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК γ - И γ' - ФАЗ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы. Получение прогнозирующих регрессионных моделей, с помощью которых можно адекватно рассчитывать механические свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, без проведения предварительных экспериментов.

Методы исследования. Для экспериментально-теоретических исследований температурной работоспособности сформирована рабочая выборка сплавов, состоящая из известных промышленных жаропрочных никелевых сплавов для монокристаллического литья отечественного и зарубежного производства, которые по содержанию основных элементов охватывают широкий диапазон легирования. Полученные 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 (линий трендов), которые оптимально описывают эти зависимости.

Полученные результаты. В работе рассмотрено влияние легирующих элементов на склонность их к образованию фаз в литейных жаропрочных никелевых сплавах. На основе влияния элементов на фазообразование впервые разработан коэффициент соотношения легирующих элементов $K_{\gamma'}$ в сплавах данного класса.

Обнаружена тесная корреляционная зависимость соотношения $K_{\gamma'}$ с размерным несоответствием кристаллических решеток γ - и γ' - фаз (мисфит). Также показано, что для многокомпонентных никелевых систем можно с высокой вероятностью прогнозировать мисфит, который существенно влияет на характеристики прочности сплавов данного класса.

Приведены регрессионные модели корреляционных зависимостей от размерного несоответствия (γ/γ' - мисфита), которые дают возможность прогнозировать границы кратковременной и длительной прочности сплавов. Показано, что величина мисфита при температуре эксплуатации должна стремиться к нулю. Это обеспечит повышение структурной стабильности за счет сведения к минимуму структурных напряжений, что оказывает положительное влияние на прочностные и пластические свойства.

Научная новизна. В работе впервые предложен коэффициент соотношения легирующих элементов $K_{\gamma'}$, который имеет тесную корреляционную связь с характеристиками прочности и размерного несоответствия литейных жаропрочных никелевых сплавов.

Практическая ценность. Показано перспективное и эффективное направление в решении задачи прогнозирования основных характеристик, влияющих на комплекс служебных свойств сплавов как при разработке новых монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, так и при совершенствовании составов известных промышленных марок данного класса.

Ключевые слова: математическое моделирование; литейные жаропрочные никелевые сплавы; размерное несоответствие кристаллических решеток (мисфит), кратковременная и долговременная прочность; соотношение легирующих элементов.

- Glotka O. A.** Ph.D, Associate professor, Associate professor of the material science department of National University «Zaporizka politeknika», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: glotka-alexander@ukr.net
- Haiduk S. V.** Sci.D, SNA, Professor of the material science department of National University «Zaporizka politeknika», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: gayduksv@gmail.com;
- Kononov V. V.** Ph.D., associate professor, associate professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University «Zaporizka politeknika», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: kononov@gmail.com

INFLUENCE OF SYSTEM ALLOYING AND DIMENSIONAL MISMATCH OF CRYSTALLINE LATTICES OF γ - AND γ' - PHASES ON THE CHARACTERISTICS OF THE STRENGTH OF SINGLE-CRYSTAL NICKEL SUPERALLOYS

Objective. Obtaining predictive regression models, by means of which, it is possible to adequately calculate the mechanical properties of monocrystalline heat-resistant nickel alloys without conducting previous experiments.

Methods of research. For experimental and theoretical studies of temperature performance, a working sample of alloys is formed consisting of known industrial heat-resistant nickel alloys for monocrystalline castings of domestic and foreign production, which, per the contents of the main elements, cover a wide range of doping. The obtained 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 (trend lines) that describe these dependencies optimally.

Received results. The influence of doping elements on their tendency to the formation of phases in foundry heat-resistant nickel alloys is considered in this work. Based on the influence of elements on phase formation, the coefficient of the ratio of doping elements $K_{\gamma'}$ in the alloys of this class was first developed.

A close correlation dependence of the ratio $K_{\gamma'}$ with a dimensional discrepancy between the γ - and γ' - phases crystalline lattice (localized) was found. It has also been shown that for multi-component nickel

systems it is possible to predict with high probability a place fire, which significantly affects the strength characteristics of alloys of this class.

The regression models of correlation dependencies on dimensional inconsistency (γ/γ' -misfit) are given, which allow to predict the boundaries of short-term and long-term strength of alloys. It is shown that the magnitude of the lighthouse at the operating temperature should tend to zero. This will increase the structural stability by minimizing structural stresses, which has a positive effect on the strength and plastic characteristics.

Scientific novelty. In the work, for the first time, a coefficient of the ratio of doping elements $K_{\gamma'}$, which has a close correlation with the strength and dimensional discrepancy of casting heat resisting nickel alloys, is proposed.

Practical value. The perspective and effective direction in solving the problem of forecasting of the main characteristics affecting the complex of service properties of alloys, both in the development of new monocrystalline heat-resistant nickel alloys, and in the improvement of the composition of known industrial brands of this class, is shown.

Key words: mathematical modeling; casting heat-resistant nickel alloys; dimensional mismatch of crystalline lattice (misfit); short-term and long-term durability; the ratio of doping elements.

REFERENCES

1. Philipp Hallensleben, Felicitas Scholz, Pascal Thome (2019) On Crystal Mosaicity in Single Crystal Ni-Based Superalloys. *Crystals*, 9. 155–164. DOI:10.3390/cryst9030149.
2. Ospennikova O. G. (2017) Sozdanie novogo pokoleniya zharoprochnykh liteynykh i deformiruemyykh splavov i staley – zalog uspehnogo razvitiya otechestvennogo dvigatelestroeniya. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 17–20.
3. Kiselev F. D. (2018) Issledovanie struktury materiala rabochih lopatok turbin aviatsionnykh gazoturbinnykh dvigateley v protsesse ekspluatatsii. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 28–37.
4. Protasova N. A., Svetlov I. L., Bronfin M. B. i dr. (2008) Razmernoe nesootvetstvie periodov kristallicheskih reshetok γ - i γ' - faz v monokristallakh zharoprochnykh nikelovykh splavov. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2008, 512–519.
5. P. Caron and T. Khan (1999) Evolution of Ni-based Superalloys for Single Crystal Gas Turbine Blade Applications. *Aerospace Science and Technology*, 3 (8), 513–523. DOI: 10.1016/S1270-9638(99)00108-X
6. Kuznetsov V. P., Lesnikov V. P., Konekova I. P. i dr. (2014) Ob'emnoe nanofaznoe uprochnenie v monokristallicheskom nikelovom splave ZhS36-VI [001] posle vyisokotemperaturnykh vyderzhek. *MiTom*, 3–6.
7. G. Eggeler, N. Wiecek, F. Fox (2018) On Shear Testing of Single Crystal Ni-Base Superalloys. *Metallurgical and materials transactions A*, 49. 3951–3962. DOI:10.1007/s11661-018-4726-9.
8. X Wu, A Dlouhy, YM Eggeler (2018) On the nucleation of planar faults during low temperature and high stress creep of single crystal Ni-base superalloys. *Acta Materialia*, 144, 642–655.
9. G Laplanche, N Wiecek, F Fox (2018) On the influence of crystallography and dendritic microstructure on micro shear behavior of single crystal Ni-based superalloys. *Acta Materialia*, 160. 173–184.
10. E. Vacchieri, A. Costa, A. Riva Creep-fatigue interactions in equiaxed and single crystal Ni-base superalloys. *EUROSUPERALLOYS 2014 – 2nd European Symposium on Superalloys and their Applications*, 14. 6. DOI:10.1051/mateconf/20141419002