

# І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 669.245.018.044:620.193.53

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

## ВПЛИВ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ ТА РОЗМІРНОЇ НЕВІДПОВІДНОСТІ РЕШТОК $\gamma$ - І $\gamma'$ - 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, сформовано роботу вибірку 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 хімічними елементами. Отримані значення оброблялись в програмному комплексі Microsoft Office з отриманням математичних рівнянь регресійних моделей (ліній трендів), що оптимально описують ці залежності.

**Отримані результати.** Розглянуто вплив легувальних елементів на схильність їх до утворення фаз та їх морфологію в ливарних жароміцних нікелевих сплавах. На основі впливу елементів на фазоутворення було вперше розроблено коефіцієнт співвідношення легувальних елементів  $K_{\gamma}$  в сплавах даного класу.

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

Наведено регресійні моделі кореляційних залежностей від розмірної невідповідності ( $\gamma / \gamma'$ - місфіту), які дають можливість прогнозувати границі короткочасної і тривалої міцності сплавів. Показано, що величина місфіта при температурі експлуатації повинна прагнути до нуля. Це буде сприяти підвищенню структурної стабільності завдяки зведенню до мінімуму структурних напружень, що забезпечує позитивний вплив на міцність та пластичні характеристики.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано коефіцієнт співвідношення легувальних елементів  $K_{\gamma}$  і 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) може бути досягнуто при застосуванні в турбіні лопаток з монокристалічною структурою, з ливарних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) нового покоління.

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  $\gamma'$ - фази, розсіяними в матриці із складнолегованого  $\gamma$ - твердого розчину на нікелевій основі [4, 5]. У свою чергу частки інтерметалічної  $\gamma'$ - фази розрізняються розмірами і складаються з кубічних мікрочастинок, які розділені нанощарками  $\gamma$ - фази.

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

Експериментально встановлено, що вплив легувальних елементів на період кристалічної решітки  $\gamma'$ - фази слабкіше, ніж  $\gamma$ -твердого розчину в багатокомпонентних жароміцних сплавах на основі нікелю. Місфіт  $\gamma / \gamma'$  визначається, головним чином, тими легуючими елементами, які найбільш сильно збільшують період решітки  $\gamma$ - твердого розчину. Такими елементами, в порядку зростання їх впливу на параметр  $\gamma$ - фази (Ru, Re, Mo, W, Nb і Ta) [9, 10].

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

#### Матеріали та методики досліджень

Для експериментально-теоретичних досліджень температурної працездатності, сформовано робочу вибірку сплавів, що складається з декількох промислових ЖНС для монокристалічного лиття вітчизняного і зарубіжного виробництва (наприклад таких марок: CMSX10, PWA1484, ЖС36, ЖС 47). Вибірку сплавів було зроблено з позиції різноманітності хімічних складів (систем легування), які за вмістом основних елементів охоплюють широкий діапазон легування.

Отримані значення оброблялися в програмному комплексі Microsoft Office з отриманням математичних рівнянь регресійних моделей (ліній трендів) з метою отримання необхідних залежностей.

#### Результати досліджень та їх обговорення

Враховуючи, що роль в опорі високотемпературної повзучості монокристалічних ЖНС належить, такому структурному параметру, як розмірна невідповідність, яка визначається від системи легування, то актуальним стає завдання – отримати оптимальні аналітичні математичні моделі для розрахунку характеристики на основі хімічного складу сплавів класу монокристалічних ЖНС.

Всі компоненти, що використовують при легуванні 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  $\gamma'$ - 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  $\gamma$ - і  $\gamma'$ - фазами. Таким чином, поділ легувальних елементів зводиться до двох груп.

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

В результаті аналізу і обробки експериментальних даних запропоновано певні співвідношення легувальних елементів:

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

де  $\eta$  – калібрувальний коефіцієнт який  $\eta \geq 1$  (для даної вибірки  $\eta = 5$ );

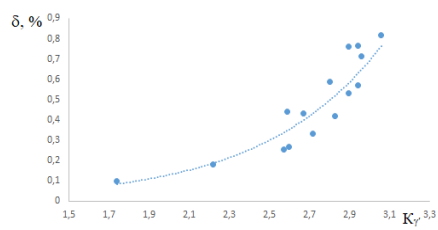
Al, Ti, Ta, Hf, Nb, Cr, Co, Mo, W, Re, Ru – масові частки відповідних хімічних елементів, % мас.

Оскільки розмірна невідповідність параметрів решітки пов'язане зі ступенем концентраційного твердорозчинного зміцнення  $\gamma$ - і  $\gamma'$ - фаз, ефективністю дисперсійного зміцнення сплаву, швидкістю повзучості і іншими властивостями монокристалів, то співвідношення  $K$  дозволяє зв'язати ці властивості з багатокомпонентними системами.

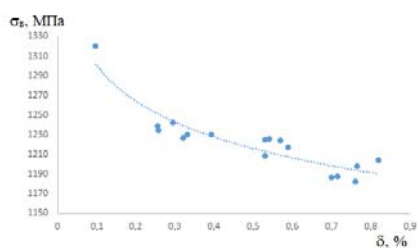
Встановлено, що розмірна невідповідність має експонентну залежність (рис. 1а) із запропонованим співвідношенням:  $\delta = 0,0045 \text{ EXP}(1,6775 K)$ ; з відносною похибкою 3,32 %. Збільшення співвідношення  $K$  призводить до підвищення ( $\delta$ ), що пов'язується зі зменшенням кількості  $\gamma$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

Встановлено, що залежність границі ( $\sigma_B$ ) 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 решітками  $\gamma$ - і  $\gamma'$ - фази утворюються значні напруження, які сприяють процесам структурної та

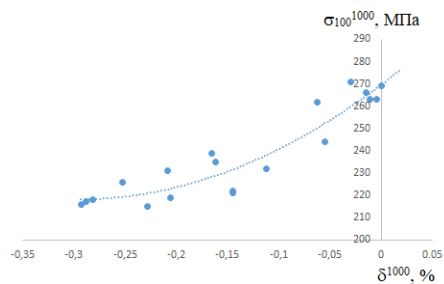
фазової нестабільності, що призводить до передчасного руйнування матеріалу. Показано, що при температурі випробувань 1000 °С, залежність меж 100- і 1000- годинних границь тривалої міцності від величини місфіта (рис. 1в, з) оптимально описується отриманими моделями:  $\sigma_{100}^{1000} = 587,7\delta^2 + 347,96\delta + 269,65$  з відносною похибкою 3,46 % (рис. 1в);  $\sigma_{1000}^{1000} = 561,4\delta^2 + 276,64\delta + 174,65$  з відносною похибкою 3,6 % (рис. 1з).



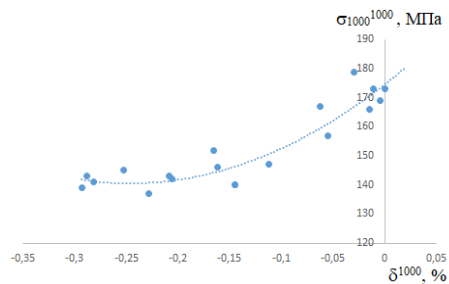
а



б



в



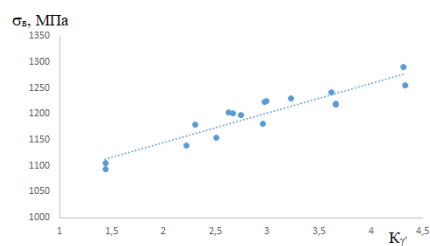
з

**Рис. 1.** Кореляційна залежність властивостей монокристалічних ЖНС від величини місфіта ( $\delta$ ) і співвідношення  $K_{\gamma'}$  в їх складі: а – залежність місфіта ( $\delta$ ) від величини співвідношення  $K_{\gamma'}$ ; б – залежність меж короткочасної міцності ( $\sigma_B$ ) від місфіта ( $\delta$ ) при 20 °С; в, з – залежність меж 100- і 1000- годинний тривалої міцності від місфіта при 1000 °С

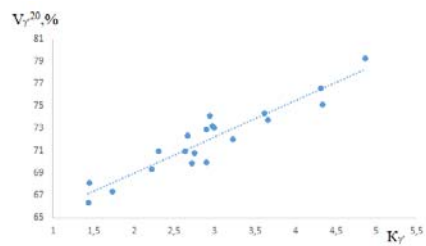
Ці залежності показують, що при температурі 1000 °С, значення розмірної невідповідності близько до нуля, сплави мають кращі показники тривалої міцності. Виходячи з вищерозглянутих залежностей, можна зробити ви-

сновок, 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 решіток  $\gamma$ -  $\gamma'$ - фаз змінюється і при температурі експлуатації величина місфіта наближається до нуля (рис. 1в, з), це знизить напруження і забезпечить поліпшення структурно-фазової стабільності, а, отже, підвищиться тривала міцність.

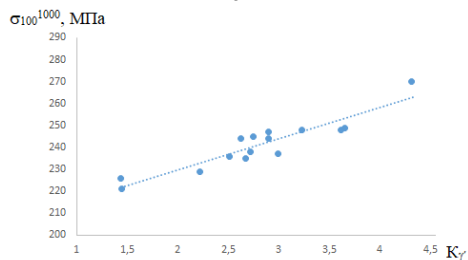
Встановлено, що запропоноване співвідношення  $K_{\gamma'}$  має тісну кореляцію з границями короткочасної ( $\sigma_B$ ) і тривалої ( $\sigma_{100}^t$ ,  $\sigma_{1000}^t$ ) міцності, а також з об'ємною часткою  $\gamma'$ - фази в монокристалічних ЖНС (рис. 2). Всі ці залежності мають лінійний характер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



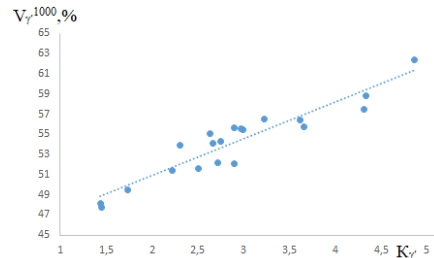
а



б



в



з

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

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

Зв'язок об'ємної частки ( $V_{\gamma'}$ )  $\gamma'$ - фази з границями короточасної і тривалої міцності із запропонованим співвідношенням  $K$  для класу монокристалічних ЖНС адекватно описуються отриманими математичними 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, проведене 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 розмірне невідповідність ( $\gamma / \gamma'$ - місфіт), границя короточасної міцності ( $\sigma_B$ ), об'ємна кількість ( $V_{\gamma'}$ )  $\gamma'$ - фази в структурі, а також межі 100- і 1000- годинної тривалої міцності ( $\sigma_{100t}$ ,  $\sigma_{1000t}$ ) для багатокомпонентних композицій монокристалічних ЖНС.

3. Наведено регресійні моделі кореляційних залежностей від розмірної невідповідності ( $\gamma / \gamma'$ -місфіта), які дають можливість прогнозувати границі короточасної 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 напрямок 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.

**Ольшанецкий В. Е., Глотка А. А., Кононов В. В. Влияние системы легирования и размерного несоответствия кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ - 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 сплавах, без проведения предварительных экспериментов.

*Методы исследования.* Для экспериментально-теоретических исследований температурной работоспо-

### 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.

2. 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.

3. 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.

4. Размерное несоответствие периодов кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ - 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.

5. 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

6. Объемное нанофазное упрочнение в монокристаллическом никелевом сплаве ЖС36–ВІ [001] после высокотемпературных выдержек / Кузнецов В. П., Лесников В. П., Конеева И. П. и др. // МиТОМ. – 2014. – № 4. – С. 3–6.

7. G. Eggeler On Shear Testing of Single Crystal Ni-Base Superalloys / G. Eggeler, N. Wiczorek, F. Fox // Metallurgical and materials transactions A. – 2018. – № 49. – P. 3951–3962. DOI:10.1007/s11661-018-4726-9.

8. 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, Y.M. Eggeler // Acta Materialia. – 2018. – № 144. – P. 642–655.

9. 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.

10. E. Vacchieri Creep-fatigue interactions in equiaxed and single crystal Ni-base superalloys / E. Vacchieri, A. Costa, A. Riva // EUROSUPERALLOYS 2014 – 2<sup>nd</sup> European Symposium on Superalloys and their Applications. – 2014. – № 14. – 6 p. DOI:10.1051/mateconf/20141419002

Одержано 01.11.2021

способности, сформирована рабочая выборка сплавов, состоящий из известных промышленных жаропрочных никелевых сплавах для монокристаллического литья отечественного и зарубежного производства, которые по содержанию основных элементов охватывают широкий диапазон легирования. Полученные значения обрабатывались в программном комплексе Microsoft Office с получением корреляционных зависимостей типа «параметр свойство» с получением математических уравнений регрессионных моделей (линий трендов), оптимально описывают эти зависимости.

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

Обнаружена тесная корреляционная зависимость соотношения  $K_{\gamma'}$  с размерной несоответствием кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ - 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 ( $\gamma$  /  $\gamma'$ - 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, оказывает положительное влияние на прочностные и пластические свойства.

**Научная новизна.** Впервые предложено коэффициент соотношения легирующих элементов  $K_{\gamma'}$ , который имеет тесная корреляционная связь с характеристиками прочности и размерной 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 складов известных промышленных марок данного класса.

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

#### **Olshanetskii V., Glotka O., Kononov V. Influence of system alloying and dimensional mismatch of crystalline lattices of $\gamma$ - and $\gamma'$ - phases on the characteristics of the strength of single-crystal nickel superalloys**

**Purpose of the work.** Obtaining predictive regression models, by means of which, it is possible to adequately calculate the mechanical properties of monocrystalline nickel-base superalloys 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 nickel-base superalloys for monocrystalline castings of domestic and foreign production, which due to contents of the main elements, cover a wide range of alloying. The obtained values were processed in the Microsoft Office 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 alloying elements on their tendency to the formation of phases in foundry heat-resistant nickel alloys is considered. Based on the influence of elements on phase formation, the coefficient of the ratio of alloying 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  $\gamma$ - and  $\gamma'$ -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 misfit, which significantly affects the strength characteristics of alloys of this class.

The regression models of correlation dependencies on dimensional inconsistency ( $\gamma$  /  $\gamma'$ -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 misfit 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.** For the first time, a coefficient of the ratio of alloying elements  $K_{\gamma'}$ , which has a close correlation with the strength and dimensional discrepancy of casting nickel-base superalloys, 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 nickel-base superalloys, and in the improvement of the composition of known industrial brands of this class, is shown.

**Key words:** mathematical modeling, casting nickel-base superalloys, dimensional mismatch of crystalline lattice (misfit), short-term and long-term durability, the ratio of alloying elements.