

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

STRUCTURE FORMATION. RESISTANCE TO DESTRUCTION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

УДК 669.245.018.044:620.193.53

- Глотка О. А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: glotka-alexander@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3117-2687
- Ольшанецький В. Ю. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: olshanolshan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Кононов В. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kononov1705@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0479-1386

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ЗАВДЯКИ ВПЛИВУ НА ПАРАМЕРТИ ГРАТОК

Мета роботи. Полягає у встановленні зв'язків між хімічним складом, механічними властивостями та розмірною невідповідністю кристалічних граток γ та γ' -фаз в жароміцних нікелевих сплавах. Що дає змогу зменшити обсяги експериментальних досліджень в умовах виробничого процесу та експериментальних розробок.

Методи дослідження. Наведено результати експериментальних і розрахункових даних, сформованих на основі експериментальних і взятих з відкритих джерел результатів. Фазовий склад визначали методом рентгеноструктурного аналізу з використанням методу фокусування Брегга-Брентано на дифрактометрі RIGAKU MINIFLEX 600 (CoK α - випромінювання). Експериментальні значення оброблялися методом найменших квадратів з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість» та встановленням математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують ці залежності.

Отримані результати. Встановлено, що зі збільшенням величини неузгодженості кристалічних граток міцність сплавів знижується внаслідок значних внутрішніх напружень. Виявлено, що для сплавів рівновісної та спрямованої кристалізації екстремум спостерігається при значенні 1,5...1,6 K γ' , це пов'язано зі зменшенням кількості елементів у γ -твердому розчині. Показано, що отримані залежності відповідають дійсності і мають збіжність з експериментальними даними на рівні 10 %.

Наукова новизна. Цінність роботи полягає в тому, що отримано залежності впливу легуючих елементів на механічні властивості та невідповідність розмірів кристалічних граток, що дозволило визначити властивості без проведення експериментів. Встановлено, що зміни в ході залежностей тісно корелюють з процесами, що відбуваються в структурі сплавів.

Практична цінність. отримані залежності можуть бути використані як для розробки нових жароміцних сплавів, так і для вдосконалення складів промислових сплавів.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, невідповідність гратки (γ/γ' -місфіт), співвідношення легуючих елементів, жароміцність.

Вступ

Деталі сучасних термонапружених газотурбінних двигунів виготовляють із багатокомпонентних жароміцних сплавів на основі нікелю, кобальту та заліза методами рівноосного, спрямованого або монокристалічного лиття. Найбільш відповідальними деталями газотурбінних двигунів є лопатки газової турбіни, що визначають максимальну температуру робочого газу на

вході турбіни. Одним із шляхів вирішення задачі підвищення робочої температури газу перед турбіною є збільшення співвідношення параметрів кристалічної решітки матриці та γ' -фази [1–6].

Мікроструктура жароміцних нікелевих сплавів представлена частинками γ' - фази, розсіяними в матриці зі складнолегованого γ - твердого розчину на нікелевій основі та в деяких випадках карбідами. Зміц-

нення γ' - фазою забезпечує тривале збереження високої температурної працездатності таких сплавів у широкому інтервалі температур, аж до 1150 °C. Отже, найважливіша роль у опорі високотемпературної повзучості жароміцних нікелевих сплавів належить таким структурно-фазовим характеристикам, як період кристалічних решіток γ - і γ' - фаз та їх розмірна невідповідність δ або γ/γ' - місфіт [7–12].

Мета роботи

Встановлення закономірностей впливу легувальних елементів на параметри кристалічних ґраток γ та γ' - фаз з метою прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів.

Матеріал і методика досліджень

Для експериментально-теоретичних досліджень температурної працездатності було сформовано роботу вибірку промислових жароміцних сплавів з позиції різноманітності хімічних складів (систем легування). За вмістом хімічних елементів сплави мають широкий діапазон легування. Значення властивостей сплавів було взято з відкритих джерел у статтях, книгах та інтернет-ресурсах. На основі були встановлені кореляційні залежності типу «параметр-властивість» як математичних моделей. Отримані рівняння мають досить високі коефіцієнти критерію кореляції $R^2 \geq 0,85$ і можуть використовуватися для прогнозування розрахунків зазначених характеристик із відносною похибкою близько 4 %.

Спектральний хімічний аналіз проводився на оптичному емісійному приладі ARL-4460 (квантометр одночасного багатоканального аналізу) у хвильовому діапазоні 170–800 нм.

Для порівняльної оцінки характеристик міцності досліджуваних сплавів проводилися механічні випробування металу за стандартних циліндричних зразках з робочою частиною (діаметр \varnothing 5 мм, довжина $l = 25$ мм) після термообробки. При кожному рівні температур і напружень випробувалося не менше 3...5 зразків.

Випробування сплаву на короточасну міцність здійснювалось на зразках за температури 20 °C на розривних машинах УМЕ-10ТМ та ПММ-20.

Випробування сплаву на тривалу міцність проводилися на аналогічних зразках за температури 1000 °C на машинах АІМА-5-2 та ZTZ 3/3 шляхом одновісного розтягування при постійному навантаженні на базі 100 годин.

Фазовий склад був визначений методом рентгено-структурного аналізу, використовуючи Бреґівські кути на приладі RIGAKU MINIFLEX 600 (CoK α - випромінювання). Зразки були розглянуті в діапазоні кутів від 20° до 120°, при режимі: $U = 30$ kV, $I = 15$ mA, крок вимірювання кута 0,1°.

Результати досліджень та їх обговорення

В результаті аналізу та обробки експериментальних даних запропоновано співвідношення легуючих елементів:

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

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

Рівняння 1 використовується для оцінки механічних властивостей та враховує комплексний вплив основних компонентів сплаву. Калібрувальний коефіцієнт (у формулі) був спеціально підібраний для забезпечення найкращого співвідношення елементів відповідно до таких міркувань. γ' - утворюючі елементи роблять значно більший внесок (приблизно в 5 разів більший) у зміцнення сплаву, за рахунок збільшення кількості зміцнюючої фази та збільшення невідповідності решіток γ/γ' (δ) у порівнянні з γ - зміцнювальними елементами. Розмірна невідповідність параметрів ґраток пов'язана зі ступенем концентраційного твердорозчинного зміцнення γ - і γ' - фаз, ефективністю дисперсійного зміцнення сплаву, швидкістю повзучості та іншими властивостями сплавів, це дає можливість пов'язати співвідношення $K_{\gamma'}$ з властивостями багатокомпонентних систем.

Встановлено, що розмірна невідповідність δ (для монокристалічних сплавів) має експоненційну залежність (рис. 1а). Збільшення співвідношення $K_{\gamma'}$ призводить до підвищення δ , що пов'язується із зменшенням кількості γ - розчинних зміцнювачів та збільшенням γ' - утворюючих елементів, які впливають на параметри кристалічних ґраток фаз та максимально збільшують їх невідповідність.

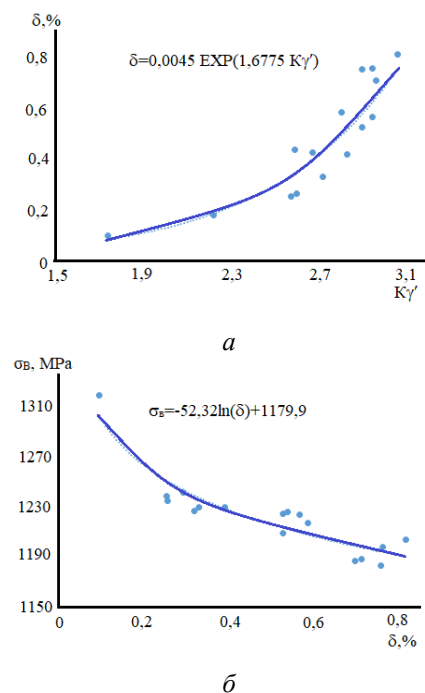


Рисунок 1. Залежність величини місфіту (а), границі короточасної міцності (б) від величини місфіту для монокристалічних сплавів

Залежність границі короточасної міцності (σ_B) від величини місфіту (рис. 1б) оптимально описується логарифмічною залежністю. Для монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів збільшення значення місфіту супроводжується зниженням границі короточасної міцності, оскільки між кристалічними ґратками γ - і γ' - фазами утворюються значні напруження, які сприяють процесам структурної та фазової нестабільності, що призводить до передчасного руйнування матеріалу.

Для сплавів спрямованої кристалізації встановлено, що збільшення співвідношення $K\gamma'$ призводить до зниження місфіту (рис. 2а) та утворення екстремуму при значеннях 1,5...1,6 $K\gamma'$, це пов'язується зі скороченням кількості елементів, що знаходяться у γ - твердому розчині. Найбільш сильно збільшують період ґратки Mo, W, Nb, Ta та ін. При значеннях $K\gamma'$ більше 1,5...1,6 спостерігається збільшення місфіту, оскільки об'ємна частка γ' - утворюючих елементів значно зростає і починає переважати. Така поведінка залежності спостерігається як при кімнатній температурі, так і при 1000°C (рис. 2б).

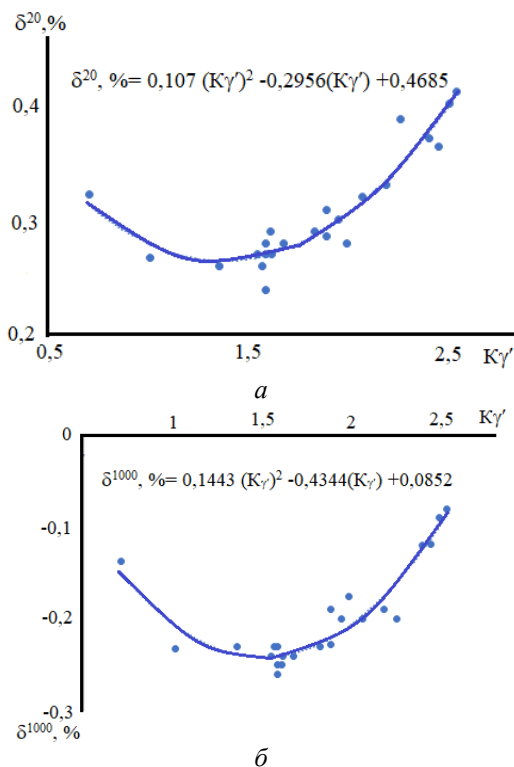


Рисунок 2. Залежність величини місфіту при 20 °С (а), місфіту при 1000 °С (б) від співвідношення $K\gamma'$ для жароміцних нікелевих сплавів спрямованої кристалізації

Експериментальну перевірку отриманих залежностей проводили на промислових жароміцних нікелевих сплавах ЗМІ-3У та Udimed-500 (різної технології отримання), для яких проводилося порівняння властивостей. Результати розрахунків параметрів кристалічних ґраток, отриманих з дифрактограм (рис. 4), наведені у таблиці 1 (дані, що отримані розрахунковим шляхом за

отриманими залежностями) та експериментальні дані (отримані за методиками, описаними вище).

Жароміцні нікелеві сплави рівноосної кристалізації мають схожий характер залежностей місфіту від співвідношення $K\gamma'$ (рис. 3а). Утворення екстремуму при значеннях 1,5 – 2 $K\gamma'$, що пов'язується зі скороченням кількості елементів, що знаходяться у γ - твердому розчині та збільшення місфіту при $K\gamma' > 1,5 - 2$, оскільки об'ємна частка γ' - утворюючих елементів значно зростає та починає переважати.

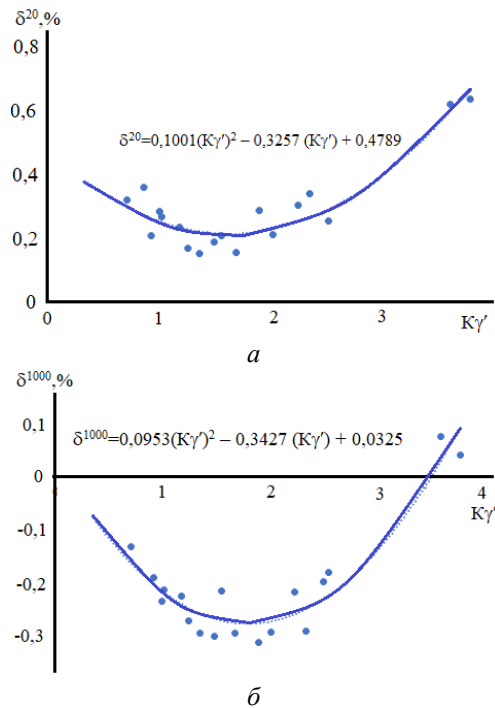


Рисунок 3. Залежність величини місфіту при 20 °С (а), місфіту при 1000 °С (б) від співвідношення $K\gamma'$ для жароміцних нікелевих сплавів рівноосної кристалізації

Таблиця 1 – Експериментальні та розрахункові значення параметрів ґратки, місфіту та механічних властивостей сплавів ЗМІ-3У і Udimed-500

Метод отримання результату	$a\gamma$, Å FCC Fm3m	$a\gamma'$, Å FCC or- dered L12	δ^{20} , %
ЗМІ-3У			
Розрахунковий	3,578	3,585	0,207
Експериментальний	3,580	3,588	0,220
Udimed-500			
Розрахунковий	3,569	3,580	0,322
Експериментальний	3,569	3,581	0,330

В таблиці 1 показано, що розрахункові та експериментальні дані добре погоджуються між собою практично за всіма параметрами. Спостерігається невелике розходження у зв'язку з можливими погрешностями вимірювань і розрахунків. Таким чином, отримані залежності можуть бути використані для прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів при розробці нових композицій або удосконаленні існуючих.

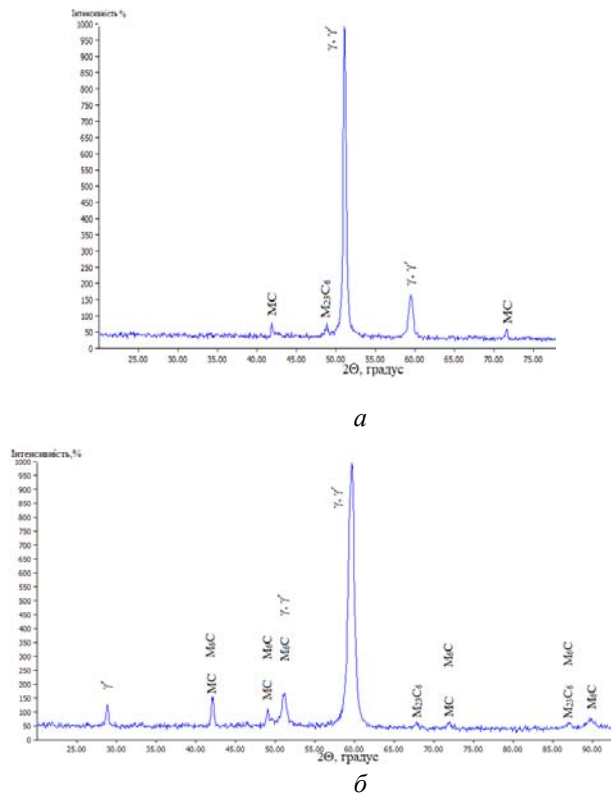


Рисунок 4. Рентгенограма сплавів ЗМІ-3У(а) та Udimed-500(б) (Co Ka випромінювання), $\lambda = 1,79 \text{ \AA}$

Висновки

1. Встановлено, що зі збільшенням значення невідповідності кристалічних ґраток (місфіту) міцність монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів знижується через значні внутрішні напруження, які сприяють процесам структурної та фазової нестабільності.
2. Показано, що при значеннях 1,5...1,6 $K\gamma'$, у сплавах рівновісної та спрямованої кристалізації, спостерігається мінімум для місфіту. Така поведінка пов'язується зі скороченням кількості елементів, що знаходяться в γ -твердому розчині, які найбільш сильно збільшують періоди ґраток.
3. Збільшення співвідношення легуючих елементів $K\gamma'$ призводить до зростання міцності та жароміцності ливарних жароміцних сплавів на нікелевій основі, внаслідок збільшення кількості зміцнюючої γ' -фази та легування γ -матриці.
4. За допомогою рентгеноструктурних досліджень виконано перевірку встановлених залежностей між властивостями сплавів та хімічним складом. Експериментальні та розрахункові дані мають невелику розбіжність значень, що не перевищують 5 – 10%.

Список літератури

1. Kvasnytska, Y. H. High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy/ Y. H. Kvasnytska, L. M. Ivaskevych, O. I. Balytskyi // Material Sciences/ - 2020. – № 56. – P. 432–440. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00447-5>
2. Min, P.G. Development of Corrosion and Heat-Resistant Nickel Alloys and their Production Technology

with the Aim of Import Substitution / P.G. Min, V.V. Sidorov, V.E. Vadeev // Power Technol Eng. – 2020. - №54. – P. 225–231. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01195-x>

3. Yonghua, R. Characterization of M23C6 carbide precipitated at grain boundaries in a superalloy / R. Yonghua, Hu. Geng, G. Yongxiang // Metallography. – 1989. – № 22(1). – P. 47–55. DOI: 10.1016/0026-0800(89)90021-9.

4. Jadav, J. Effects of Strain Rate and Temperature on Tensile Properties, Deformation and Dynamic Strain Ageing Behavior of Ni-Base Superalloy / J. Jadav, K.V. Rajulapati, Rao. Bhanu Sankara // INAE Letter. – 2019. – № 4. – P. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41403-019-00083-9>

5. Chen, K. Microstructure and homogenization process of as-cast GH4169D alloy for novel turbine disk / K. Chen, Sy. Rui, F. Wang // Int J Miner Metall Mater. – 2019. – № 26. – P. 889–900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1802-0>

6. Biroasca, S. Crystallographic Orientation Relationship with Geometrically Necessary Dislocation Accumulation During High-Temperature Deformation in RR1000 Nickel-Based Superalloy/ S. Biroasca // Metall Mater Trans A. – 2019. – № 50. – P. 534–539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-5036-y>

7. Seidel, A. Additive Manufacturing of Powdery Ni-Based Superalloys Mar-M-247 and CM 247 LC in Hybrid Laser Metal Deposition / A. Seidel, T. Finaske, A. Straubel // Metall Mater Trans A. – 2018. – № 49. – P. 3812–3830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4777-y>

8. Ritt, P. Application of Plasma Spraying as a Precursor in the Synthesis of Oxidation-Resistant Coatings/ P. Ritt, O. Lu-Steffes, R. Sakidja // J Therm Spray Tech. – 2013. – № 22. – P. 992–1001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9947-2>

9. Glotka O.A. Modelling the composition of carbides in nickel-based superalloys of directional crystallization / O.A. Glotka O.A. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2020. – № 102/1. – P. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6324>

10. Glotka, A.A. Distribution of Alloying Elements in the Structure of Heat-Resistant Nickel Alloys in Secondary Carbides / A.A. Glotka, S.V. Gaiduk // J Appl Spectrosc. – 2020. – № 87. – P. 812–819. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10812-020-01075-2>

11. Avila-Davila, E.O. Evaluation of Microstructural Deterioration for a Directionally Solidified Ni-Based Superalloy by X-ray Computed Tomography / E.O. Avila-Davila, L.M. Palacios-Pineda, F.O. Canto-Escajadillo // J. of Mater Eng and Perform. – 2021. – № 56. – P. 235–267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05377-6>

12. Liang, T. Role of script MC carbides on the tensile behavior of laser-welded fusion zone in DZ125L/IN718 joints at 650 °C / T. Liang, L. Wang, Y. Liu // J Mater Sci. – 2020. – № 55. – P. 13389–13397. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04931-w>

Одержано 23.10.2023

NICKEL-BASED SUPERALLOYS EXPLOITATIONAL PROPERTIES RISING DUE TO THE INFLUENCE ON LATTICE PARAMETERS

- Hlotka O. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: glotka-alexander@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3117-2687
- Ol’shanetskii V. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Physical Material Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: olshanolshan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Kononov V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Technologies, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kononov1705@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0479-1386

Objective. It consists in establishing relationships between the chemical composition, mechanical properties, and dimensional inconsistency of crystal lattices of nickel-based superalloys. That makes it possible to reduce the volume of experimental research in the conditions of the production process and experimental developments.

Research methods. The results of experimental and calculated data, formed on the basis of experimental and results taken from open sources, are given. The phase composition was determined by X-ray structural analysis using the Bragg-Brentano focusing method on a RIGAKU MINIFLEX 600 diffractometer (CoK α radiation). The experimental values were processed by the method of least squares with obtaining correlation dependencies of the “parameter-property” type and establishing mathematical equations of regression models that optimally describe these dependencies.

Obtained results. It was established that with an increase in the amount of misalignment of crystal lattices, the strength of alloys decreases due to significant internal stresses. It was found that for alloys of uniform and directional crystallization, the extremum is observed at a value of 1.5...1.6 K γ' , this is due to a decrease in the number of elements in the γ -solid solution. It is shown that the obtained dependences correspond to reality and coincide with experimental data at the level of 10 %.

Scientific novelty. The value of the work lies in the fact that the dependence of the influence of alloying elements on the mechanical properties and the discrepancy in the sizes of the crystal lattices was obtained, which made it possible to determine the properties without conducting experiments. It was established that changes in the course of dependencies are closely correlated with the processes taking place in the structure of alloys.

Practical value. The obtained dependencies can be used both for the development of new superalloys and for the improvement of the compositions of industrial alloys.

Key words: nickel-based superalloys, lattice mismatch (γ/γ' - mismatch), ratio of alloying elements, heat resistance.

References

1. Kvasnytska Y.H., Ivaskevych L.M., Balytskyi O.I. (2020). High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy: Mater Sci, 56, 432–440. doi: 10.1007/s11003-020-00447-5
2. Min P.G., Sidorov V.V., Vadeev V.E. (2020). Development of Corrosion and Heat-Resistant Nickel Alloys and their Production Technology with the Aim of Import Substitution: Power Technol Eng, 54, 225–231. doi: 10.1007/s10749-020-01195-x
3. Yonghua R., Geng Hu., Yongxiang, G. (1989). Characterization of M23C6 carbide precipitated at grain boundaries in a superalloy: Metallography, №22(1), 47-55. doi: 10.1016/0026-0800(89)90021-9.
4. Jadav J., Rajulapati K.V., Bhanu Sankara Rao K. (2019). Effects of Strain Rate and Temperature on Tensile Properties, Deformation and Dynamic Strain Ageing Behavior of Ni-Base Superalloy: INAE Lett, 4, 241–250. doi: 10.1007/s41403-019-00083-9
5. Chen K., Rui Sy., Wang, F. (2019). Microstructure and homogenization process of as-cast GH4169D alloy for novel turbine disk: Int J Miner Metall Mater, 26, 889–900. doi: 10.1007/s12613-019-1802-0
6. Biroscia S. (2019). Crystallographic Orientation Relationship with Geometrically Necessary Dislocation Accumulation During High-Temperature Deformation in RR1000 Nickel-Based Superalloy: Metall Mater Trans A, 50, 534–539. doi: 10.1007/s11661-018-5036-y
7. Seidel A., Finaske, T., Straubel, A. (2018). Additive Manufacturing of Powdery Ni-Based Superalloys Mar-M-247 and CM 247 LC in Hybrid Laser Metal Deposition: Metall Mater Trans A, 49, 3812–3830. doi: 10.1007/s11661-018-4777-y
8. Ritt P., Lu-Steffes, O., Sakidja, R. (2013). Application of Plasma Spraying as a Precursor in the Synthesis of Oxidation-Resistant Coatings: J Therm Spray Tech, 22, 992–1001. doi: 10.1007/s11666-013-9947-2
9. Glotka O.A. (2020). Modelling the composition of carbides in nickel-based superalloys of directional crystallization: Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 102/1, 5-15. doi:10.5604/01.3001.0014.6324
10. Glotka, A.A., Gaiduk, S.V. (2020). Distribution of Alloying Elements in the Structure of Heat-Resistant Nickel Alloys in Secondary Carbides: J Appl Spectrosc, 87, 812–819. doi: 10.1007/s10812-020-01075-2
11. Avila-Davila E.O., Palacios-Pineda L.M., Canto-Escajadillo F.O. (2021). Evaluation of Microstructural Deterioration for a Directionally Solidified Ni-Based Superalloy by X-ray Computed Tomography: J. of Materi Eng and Perform, 56, 235-267. doi: 10.1007/s11665-020-05377-6
12. Liang T., Wang L., Liu Y. (2020). Role of script MC carbides on the tensile behavior of laser-welded fusion zone in DZ125L/IN718 joints at 650°C: J Mater Sci, 55, 13389–13397. doi: 10.1007/s10853-020-04931-w