

Прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів спрямованої кристалізації

О. А. Глотка, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри,
glotka-alexander@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3117-2687>

В. Ю. Ольшанецький, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,
olshan@zntu.edu.ua

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

Метою роботи є отримання математичних моделей, за якими, можна з великою вірогідністю розраховувати властивості жароміцних нікелевих сплавів, без проведення попередніх досліджень. Для проведення експерименту обрано промислові сплави направленої кристалізації вітчизняного і зарубіжного виробництва. Одержані результати оброблялися методом найменших квадратів з отриманням кореляційних залежностей і математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують ці залежності. Це дозволило вперше запропонувати співвідношення легуючих елементів для сплавів направленої кристалізації, що використовується для оцінки механічних властивостей, та враховують комплексний вплив основних компонентів сплаву. Через те що, розмірна невідповідність параметрів кристалічної ґратки пов'язана зі ступенем концентраційного твердорозчинного зміцнення γ - і γ' -фаз, ефективністю дисперсійного зміцнення сплаву, швидкістю повзучості і іншими властивостями, отримане співвідношення дозволяє зв'язати ці властивості з багатокомпонентними системами. Наведені формули дають можливість розрахувати розмірну невідповідність, міцність, жароміцність, кількість γ' -фази і густину сплавів з високою точністю. Встановлено залежності впливу складу на властивості жароміцних нікелевих сплавів направленої кристалізації. Показано, що для багатокомпонентних нікелевих систем можна з високою вірогідністю прогнозувати місфит (відношення періодів кристалічних ґраток γ - і γ' -фаз), який істотно впливає на характеристики міцності сплавів даного класу. Зниження його значення супроводжується збільшенням розчинності елементів в γ -твердому розчині при значенні співвідношення легуючих елементів 1,5 – 1,6. Однак збільшення співвідношення легуючих елементів більше 2 супроводжується зростанням місфиту, оскільки γ -твердий розчин досягає максимуму розчинення. Показано перспективний і ефективний напрямок у вирішенні задачі прогнозування основних характеристик, що впливають на комплекс службових властивостей сплавів як при розробці нових жароміцних нікелевих сплавів, так і при вдосконаленні складів відомих промислових марок даного класу.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, розмірна невідповідність кристалічних ґраток γ і γ' -фаз, міцність, жароміцність.

Розробка нових і оптимізація існуючих сплавів для литих високонавантажених виробів, якими є робочі та соплові лопатки ГТД, є актуальним матеріалознавчим, конструкторським і технологічним завданням. Для сучасних термонапружених газотурбінних двигунів такі

Структура та фізико-механічні властивості

складнопрофільні деталі виготовляють з багатокомпонентних жароміцних сплавів на основі нікелю, кобальту і заліза методами спрямованого або монокристалічного лиття [1-4].

Розробки останніх років мають тенденцію до використання лопаткових матеріалів з низьким вмістом дорогих елементів. Однією з проблем такого типу матеріалів є підвищення їх міцності. Для збільшення жароміцності сплави легують підвищеним вмістом хрому, вольфраму, молібдену, ренію та рутенію. Однак, високий вміст цих елементів може призвести до появи в процесі напрацювання в структурі топологічно щільноупакованих фаз типу μ чи σ і зниження фазової стабільності деталей [5-8].

Зміцнення γ' -фазою забезпечує тривале збереження високої температурної працездатності сплавів даного класу в широкому інтервалі температур. Найважливіша роль в опорі високотемпературній повзучості жароміцних сплавів належить, таким структурно-фазовим характеристикам, як період кристалічних решіток γ - і γ' -фаз і їх розмірна невідповідність.

Метою роботи є отримання математичних моделей, за якими, можна розраховувати властивості жароміцних нікелевих сплавів спрямованої кристалізації, без проведення попередніх досліджень.

Для досліджень властивостей жароміцних нікелевих сплавів спрямованої кристалізації сформована робоча вибірка промислових сплавів вітчизняного і зарубіжного виробництва, наступних марок: ЖС-26, ЖС-26У, ЖС6Ф, ЖС-28, ЖС-30, ВЖЛ-20, GTD-111, Mar-M247, CM-247LC, Mar-M200 + Hf, Mar-M246 + Hf, U-500, U-700, PWA-1422, PWA-1426, CM-186LC, Rene 142, Rene 150, IN-792LC, DS-16, Mar-M002, Rene 125, Rene 80H. Вибірка сплавів була зроблена з позиції різноманітності хімічних складів (систем легування), які за вмістом основних елементів мають широкий діапазон легування.

Отримані значення оброблялися в програмному комплексі Microsoft Office в пакеті EXCEL з отриманням математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують залежності, і побудовою ліній трендів. Залежності мають досить високий коефіцієнт детермінації $R^2 \geq 0,85$ і можуть бути використані для визначення властивостей жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС).

Основними структурними складовими жароміцних сплавів на нікелевій основі є γ - та γ' -фази. Одним з основних параметрів, що визначають властивості цих сплавів є співвідношення (невідповідність) параметрів їх кристалічних ґраток (δ місфіт), що розраховуються за формулою:

$$\delta = 2 \cdot ((a_{\gamma'} - a_{\gamma}) / (a_{\gamma} + a_{\gamma'})) \cdot 100\% \quad (1),$$

де a_{γ} та $a_{\gamma'}$ – періоди ґраток γ - і γ' -фаз, відповідно [2, 5].

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 карбідотворюючі елементи (Ti, Ta, Hf, Nb, V, W, Mo, Cr).

Структура та фізико-механічні властивості

До складу γ' -фази можуть входити: Al, Ti, Nb, Cr, Co, Mo, W, V і ін. Їх вміст в γ' -фазі і вплив на її кількість в структурі різний. Це пов'язано зі здатністю елементів утворювати з нікелем стабільні інтерметаліди типу Ni_3Me . Отже на місфіт і механічні властивості сплавів впливають не тільки елементи, які відносяться до γ' -утворюючих, а й ті, які класифікуються як елементи γ -твердорозчинного зміцнення [9, 10].

В результаті обробки експериментальних даних і наведених вище уявлень, вперше запропоновано співвідношення, яке враховує комплексний вплив основних компонентів сплаву:

$$K_{\gamma} = 5 \cdot \frac{\sum_{\gamma}(Al + Ti + Nb + Ta + Hf)}{\sum_{\gamma}(Cr + W + Mo + Re + Co + Ru)} \quad (2)$$

де 5 – калібрувальний коефіцієнт був визначений емпіричним шляхом для оцінки властивостей, який враховує комплексний вплив основних компонентів сплаву. В чисельнику та знаменнику підставляються значення масової частки відповідних елементів, які знаходяться в сплаві. Коефіцієнт K_{γ} дозволяє зв'язати хімічний склад та властивості багатоконпонентних сплавів на основі нікелю (табл. 1).

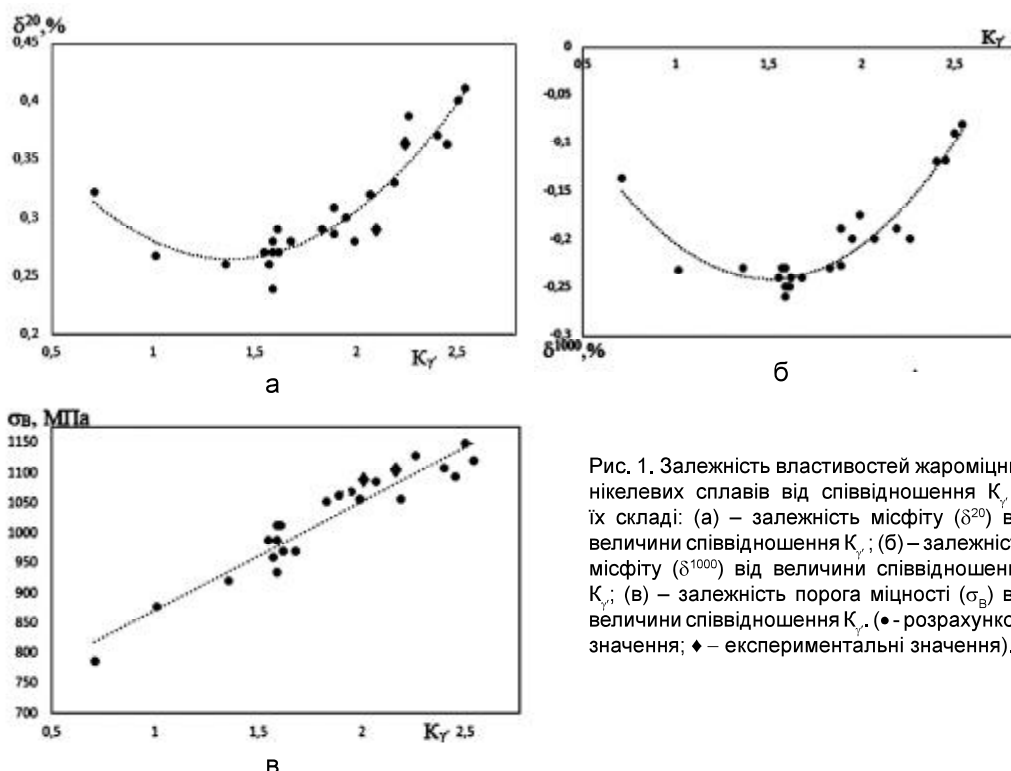
Таблиця 1

Залежності властивостей жароміцних нікелевих сплавів від параметру K_{γ}

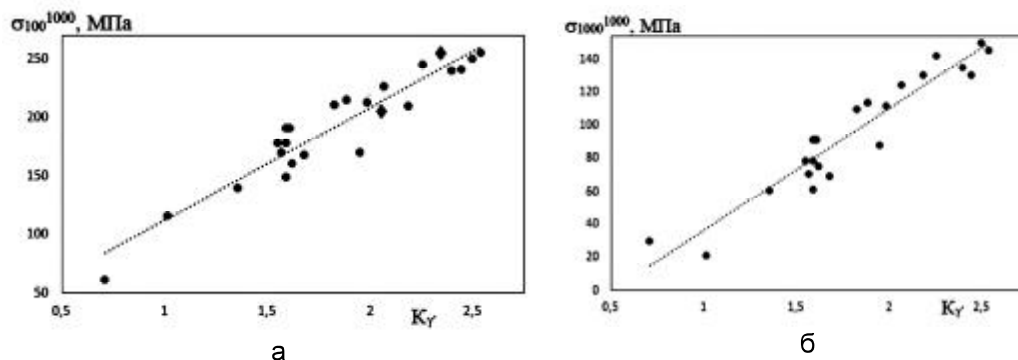
Критерій	Прогнозуючі регресійні моделі
Розмірна невідповідність δ при 20°C	$\delta^{20}, \% = 0,107 (K_{\gamma})^2 - 0,2956(K_{\gamma}) + 0,4685$
Розмірна невідповідність δ при 1000°C	$\delta^{1000}, \% = 0,1443 (K_{\gamma})^2 - 0,4344(K_{\gamma}) + 0,0852$
Міцність σ_B при 20°C	$\sigma_B, \text{МПа} = 181,73 K_{\gamma} + 690,2$
Довготривала міцність при 100 годинах	$\sigma_{100}^{1000}, \text{МПа} = 96,219 K_{\gamma} + 15,975$
Довготривала міцність при 1000 годинах	$\sigma_{1000}^{1000}, \text{МПа} = 73,647 K_{\gamma} + 37,404$
Об'ємна частка γ' - фази при 20°C	$V_{\gamma'}^{20}, \% = 10,813 K_{\gamma} + 37,364$
Об'ємна частка γ' - фази при 1000°C	$V_{\gamma'}^{1000}, \% = 17,686 K_{\gamma} + 11,45$

Збільшення співвідношення K_{γ} (2) призводить до зниження місфіту і утворення екстремуму при значеннях 1,5...1,6 K_{γ} . Це пов'язано зі збільшенням розчинності легуючих елементів в γ -твердому розчині, які найбільш сильно збільшують період ґратки (Mo, W, Nb, Ta та ін.). При значеннях K_{γ} понад 1,5...1,6 спостерігається збільшення місфіту, оскільки твердий розчин досяг границі розчинності. Значення міцності при збільшенні показника співвідношення K_{γ} підпорядковується лінійному закону і має тенденцію до постійного зростання (рис. 1 в), оскільки зі збільшенням співвідношення кількість елементів, що утворюють зміцнюючу фазу зростає.

Показано, що при температурі 1000 °C, залежність границі тривалої міцності від величини місфіту (рис. 2 а, б) адекватно описується моделями (табл. 1). При збільшенні коефіцієнта K_{γ} , тривала міцність сплавів зростає пропорційно, оскільки кількість γ' -утворюючих елементів зростає, а, отже, збільшується кількість γ' -фази в сплаві.



Запропоноване співвідношення K_γ (2) корелює з об'ємною часткою γ' -фази в сплавах направленої кристалізації (рис. 3). Всі ці залежності мають лінійний характер з позитивним кутовим коефіцієнтом і похибкою не більше $\pm 3,8\%$. Це пояснюється тим, що зі збільшенням K_γ збільшується об'ємна кількість вмісту основних зміцнюючих елементів, котрі утворюють γ' -фазу як при кімнатній температурі (рис. 3 а), так і залишкової при підвищених температурах експлуатації (рис. 3 б).



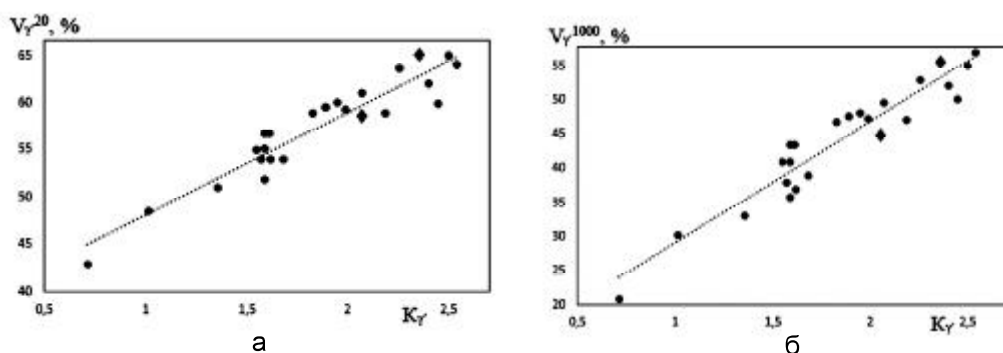


Рис. 3. Залежності об'єму γ -фази в ЖНС від співвідношення K_{γ} в їх складі: (а) – залежність об'єму γ -фази при кімнатній температурі (V_{γ}^{20} , %) від величини співвідношення K_{γ} ; (б) – залежність об'єму γ -фази при 1000 °С (V_{γ}^{1000} , %) від величини співвідношення K_{γ} (• – розрахункові значення; ♦ – експериментальні значення).

Результати розрахунку теплофізичних характеристик сплавів направленої кристалізації в подальшому порівнювали з експериментальними даними. Для підтвердження розрахункових значень обрано промислові DSMGA1400 та сплав ЖС32. На основі аналізу експериментальних показників механічних властивостей досліджуваних сплавів в табл. 2 наведено значення розрахункових властивостей, отриманих з використанням активного експерименту.

Показано, що розрахункові та експериментальні дані добре узгоджуються між собою практично за всіма параметрами, похибка не перевищує $\pm 3\%$. Отримані математичні залежності дають можливість прогнозувати властивості при розробці нових складів жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС).

Таблиця 2

Розрахункові та експериментальні властивості жароміцних нікелевих сплавів

Метод отримання результатів	Властивості жароміцних сплавів				
	σ_B , МПа	δ^{20} , %	σ_{100}^{1000} , МПа	V_{γ}^{20} , %	V_{γ}^{1000} , %
DSMGA1400					
Розрахункові	1090	0,26	180	56	42
Експериментальні	1060	0,27	198	59	45
ЖС32					
Розрахункові	1090	0,35	240	62	51
Експериментальні	1100	0,36	245	64	55

ВИСНОВКИ

1. На основі емпіричного підходу отримано нове співвідношення K_γ за величиною якого можна адекватно прогнозувати розмірну невідповідність (γ/γ' -місфіт), границю короткотривалої міцності, об'ємну кількість γ' - фази в структурі, а також границю 100 - і 1000-годинної тривалої міцності для багатокомпонентних композицій ЖНС.

2. Утворення екстремуму при значеннях $K_\gamma = 1,5...1,6$, що зумовлено скороченням кількості елементів в γ -твердому розчині, які найбільше збільшують період гратки. При значеннях K_γ понад 1,5...1,6 спостерігається збільшення місфіту, оскільки об'ємна частка γ' -утворюючих елементів значно зростає.

3. Показано перспективний напрямок при вирішенні задачі прогнозування основних характеристик, які впливають на комплекс службових властивостей жароміцних нікелевих сплавів.

Література

1. Bondarenko, Y.A., Echin, A.B., Bazhenov, V.E. Simulation of the temperature distribution on the mold surface and inside casting during high-gradient directional solidification // Russ. J. Non-ferrous Metals. – 2017. - №58. – P. 481-488. <https://doi.org/10.3103/S1067821217050042>
2. Das N. Advances in nickel-based cast superalloys // Trans Indian Inst Met. – 2010. – № 63. – P. 265-274. <https://doi.org/10.1007/s12666-010-0036-7>
3. Mukai K., Li Z., Mills K.C. Prediction of the densities of liquid Ni-based superalloys // Metall Mater Trans B. – 2005. – № 36. – P. 255-262. <https://doi.org/10.1007/s11663-005-0027-y>
4. Li Z., Mills K.C. The effect of γ' content on the densities of Ni-based superalloys // Metall Mater Trans B. – 2006. – № 37. – P.781-790. <https://doi.org/10.1007/s11663-006-0060-5>
5. Huang J., Yang X., Shi D. et al. A simple unified critical plane damage parameter for high-temperature LCF life prediction of a Ni-based DS superalloy // J Mater Sci. – 2014. – № 49. – P. 7625-7638. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8418-6>
6. Li L., Deceuster A., Zhang, C. Effect of Process Parameters on Pulsed-Laser Repair of a Directionally Solidified Superalloy // Metallogr. Microstruct. Anal. – 2012. – № 1. – P. 92-98. <https://doi.org/10.1007/s13632-012-0016-x>
7. Alam, M.Z., Hazari, N. & Das, D.K. Microstructure and oxidation performance of a γ - γ' Pt-aluminide bond coat on directionally solidified superalloy CM-247LC // Bull Mater Sci. – 2014. – № 37. – P. 1551-1561. <https://doi.org/10.1007/s12034-014-0110-6>
8. Wu L., Osada T., Watanabe I., Yokokawa T., Kobayashi T., Kawagishi K. A New Approach to Strength Prediction of Ni-Base Disk Superalloys with Dual-Phase γ/γ' // Superalloys 2020. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. – 2020. – P. 651-658. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51834-9_63
9. Chan K.S. Mechanistic Modeling of Strain Hardening in Ni-Based Superalloys // Metall Mater Trans A. – 2020. – № 51. – P. 5653-5666. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05965-0>
10. Glotka O.A., Ovchinnikov O.V., Degtyaryov V.I. et al. Application of Domestic Heat-Resistant Powders in Additive Techniques // Powder Metall Met Ceram. – 2018. – № 56. – P. 726 -732. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9948-2>

References

1. Bondarenko Y.A., Echin A.B., Bazhenov V.E., Russ. J. *Non-ferrous Metals*, 2017, No. 58, pp. 481-488[in English]. <https://doi.org/10.3103/S1067821217050042>
2. Das N., *Trans Indian Inst Met*, 2010, No. 63, pp. 265-274. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s12666-010-0036-7>
3. Mukai K., Li Z., Mills K.C., *Metall Mater Trans B*, 2005, No. 36, pp. 255-262. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11663-005-0027-y>
4. Li Z., Mills K.C., *Metall Mater Trans B*, 2006, No. 37, pp.781-790. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11663-006-0060-5>
5. Huang J., Yang X., Shi D., *J Mater Sci*, 2014, No. 49, pp. 7625-7638. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8418-6>
6. Li L., Deceuster A., Zhang C., *Metallogr. Microstruct. Anal*, 2012, No. 1, pp. 92-98. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s13632-012-0016-x>
7. Alam M.Z., Hazari N., Das D.K., *Bull Mater Sci*, 2014, No. 37, pp. 1551-1561. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s12034-014-0110-6>
8. Wu L., Osada T., Watanabe I., Yokokawa T., Kobayashi T., Kawagishi K., Superalloys 2020., *The Minerals, Metals & Materials Series. Springer*, Cham. – 2020, pp. 651-658. [in English].https://doi.org/10.1007/978-3-030-51834-9_63
9. Chan K.S., *Metall Mater Trans A*, 2020, No. 51, pp. 5653-5666. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05965-0>
10. Glotka, O.A., Ovchinnikov, O.V., Degtyaryov, V.I. *Powder Metall Met Ceram*, 2018, No. 56, pp. 726-732. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9948-2>

Одержано 05.04.21

O. A. Glotka, V. Yu. Olshanetskii

Predicting the properties of nickel-based superalloys directional crystallization

Summary

The aim of this work is to obtain predictive regression models, with which it is possible to adequately calculate the mechanical properties of heat-resistant nickel alloys, without prior experiments. Industrial alloys of directional crystallization of domestic and foreign production were selected for research. The values were processed by the method of least squares to obtain correlations with the receipt of mathematical equations of regression models that optimally describe these dependencies. As a result of processing of experimental data, the ratio of alloying elements which can be used for an estimation of mechanical properties taking into account complex influence of the main components of an alloy is offered for the first time. Since the dimensional mismatch of the lattice parameters is associated with the degree of concentration of solid-soluble hardening of γ - and γ' -phases, the efficiency of dispersion hardening of the alloy, creep rate and other properties, the obtained ratio allows to link these properties with multicomponent systems. Regression models are presented, with the help of which it is possible to calculate dimensional mismatch, strength, heat resistance,

number of γ' -phases and density of alloys with high accuracy. The regularities of the composition influence on the properties of heat-resistant nickel alloys of directional crystallization are established. It is shown that for multicomponent nickel systems it is possible to predict with high probability misfit, which significantly affects the strength characteristics of alloys of this class. The decrease in the value of misfit is accompanied by an increase in the solubility of the elements in the γ -solid solution at a value of the ratio of alloying elements of 1.5 - 1.6. However, an increase in the ratio of alloying elements greater than 2 is accompanied by an increase in misfit, because the γ -solid solution has reached a maximum of dissolution. The perspective and effective direction in the decision of a problem of forecasting of the basic characteristics influencing a complex of service properties of alloys both at development of new heat-resistant nickel alloys, and at perfection of structures of known industrial marks of this class is shown.

Keywords: nickel-based superalloys, dimensional mismatch (γ/γ' -mismatch), strength, heat resistance.

Metalozn. obrobka met. 2021, vol.27(99), 22-31

<https://doi.org/10.15407/mom2021.03.022>

УДК 669.295

Мікроструктура сплаву ВТ8 після випробувань на малоциклову втому

З. А. Дурягіна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри, zduriagina@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2585-3849>

І. А. Лемішка, кандидат технічних наук, асистент кафедри, mzihor@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3231-0519>

О. С. Філімонов, аспірант кафедри, filimonov.alexey.97@gmail.com

А. М. Тростянчин, кандидат технічних наук, доцент кафедри, trostianchyn@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0642-0693>

В. В. Кулик, доктор технічних наук, доцент кафедри, kulykvolodymyrvolodymyrovych@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5999-3551>

Л. І. Богун, кандидат технічних наук, доцент кафедри, lidabohun@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3077-7756>

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Досліджено зразки титанового сплаву марки ВТ8 що використовується для виготовлення елементів газотурбінних двигунів, у вихідному стані та після випробувань на тріщиностійкість методами трансмісійної електронної мікроскопії та дифракційного аналізу. Встановлено особливості мікроструктури, морфології будови, характеру розподілу фаз та структурних складових. На трансмісійному електронному мікроскопі JEM-200CX ідентифіковано дефекти кристалічної будови, формування дислокаційних неоднорідностей