

УДК 620.17:620.1:669.245

**КОМПЛЕКСНЕ МОДИФІКУВАННЯ ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ
ЖСЗДК-ВІ ІТРИЄМ ТА КАРБОНІТРИДОМ ТИТАНУ**

С. М. ДАНИЛОВ¹, Д. О. ТЬОМКІН¹, О. О. ПЕДАШ²,
О. О. НАУМИК³, В. В. НАУМИК³

¹ Запорізький машинобудівний завод ім. В. І. Омеляченка;

² АТ "Мотор Січ", Запоріжжя;

³ Національний університет "Запорізька політехніка"

Досліджено зразки, відлиті зі жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, комплексно модифікованого ітрієм та карбонітридом титану в різних комбінаціях, після гарячого ізостатичного пресування (ГІП) та подальшої термічної обробки. Комплексно модифікували, одночасно використовуючи ітрій та церій. Встановлено, що хімічний склад (з урахуванням кількості ітрію), а також механічні та жароміцні властивості литих зразків всіх варіантів відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85, за винятком ударної в'язкості зразків без карбонітриду титану, яка майже вдвічі нижча за висувану розробником для відповідальних литих авіаційних виробів, а також для зразків з карбонітридом титану. Найкращий модифікувальний ефект одержано за комплексного модифікування сплаву з 0,075% карбонітриду титану. В інших варіантах виявлено огрубіння структури, а для зразків без нього – ще і оплавлення евтектичної (γ - γ')-фази, що, ймовірно, і викликало зниження ударної в'язкості. В результаті ГІП мікропори і пухкості, що не виходять на поверхню деталей (розташовані у внутрішніх обсягах металу), заліковуються, що сприяє стабілізації структури та властивостей матеріалу.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, литий зразок, хімічний склад, модифікування, ітрій, карбонітрид титану, гаряче ізостатичне пресування, макро- і мікроструктура, механічні властивості, ударна в'язкість, тривала міцність.

Samples cast from heat-resistant nickel ЖСЗДК-BI alloy, complex modified with yttrium and titanium carbonitride in various combinations, after hot isostatic pressing (HIP) and subsequent heat treatment, were investigated. For comparison, complex modification was performed with the simultaneous use of yttrium and cerium. It was established that the chemical composition (taking into account the presence of yttrium in the alloys), as well as the mechanical and heat-resistant properties of the cast samples meet the requirements of OST 1.90.126-85, with the exception of the impact ductility of the samples without titanium carbonitride, which is almost twice lower than the additional requirements put forward by the developer for responsible aircraft castings, and also for the samples with titanium carbonitride. The best modifying effect was obtained with the complex modified alloy with 0.075% titanium carbonitride. In other options, there is a coarsening of the structure, and for the samples without titanium carbonitride, melting of the eutectic (γ - γ')-phase is also observed, which probably contributes to the reduction of impact toughness. As a result of HIP, micropores and loosening which do not reach the surface of the parts (located in the internal volumes of the metal) are healed, which contributes to the stabilization of the material structure and properties.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, cast sample, chemical composition, modification, yttrium, titanium carbonitride, hot isostatic pressing, macro- and microstructure, mechanical properties, impact toughness, long-term strength.

Вступ. Литі лопатки – основні деталі авіаційних двигунів, що забезпечують перетворення потенційної енергії палива, що згорає, в кінетичну енергію турбіни, що обертається [1–3]. Їх виготовляють зі жароміцних нікелевих сплавів спеціальними методами лиття, оскільки вони працюють в умовах високих навантажень і температур [4–7] за реальної загрози руйнування через позаштатне попадання стороннього предмета (наприклад, птаха) в турбіну. Тому тут особливе значення серед інших механічних властивостей має саме ударна в'язкість матеріалу лопаток.

Наведено результати досліджень [8–10], спрямованих на поліпшення комплексу механічних властивостей при кімнатних і підвищених температурах. Особливу увагу приділено тривалій міцності жароміцних сплавів [11–14], але мало – ударній в'язкості.

Для конкретних умов використання розроблено [15–19] нові жароміцні матеріали з поліпшеними властивостями. При цьому можливості відомих сплавів (наприклад, ЖСЗДК-ВІ) ще повністю не вичерпані. Їх характеристики можна суттєво підвищити спеціальними технологічними операціями – модифікуванням, рафінуванням [20–29] тощо. Саме комплексно застосовуючи гаряче ізостатичне пресування (ГІП) та термічну обробку (ТО), вдається суттєво поліпшити експлуатаційні властивості відповідальних литих деталей.

Виявлено [30] позитивний вплив модифікування сплаву ЖСЗДК-ВІ ітрієво-вмісною лігатурою ІГН-1 у комплексі з ГІП та стандартною ТО на його характеристики. Однак через особливості експлуатації матеріал таких литих виробів, зокрема лопаток турбіни вентилятора, повинен володіти поліпшеними механічними властивостями і бути стійким до руйнування від ударного згину. Розробникам двигунів слід збільшити міцність та пластичність, а також забезпечити ударну в'язкість матеріалу вище 5 J/cm^2 .

Мета цього дослідження – вивчити можливості підвищення механічних властивостей сплаву ЖСЗДК-ВІ комплексним модифікуванням розплаву.

Матеріали та методи випробувань. Досліджували матеріал зразків, а також фрагментів, вирізаних з нижньої найщільнішої частини технологічних блоків, відлитих зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, комплексно модифікованого ітрієм та карбонітридом титану за двома варіантами: присадка 0,025% Ti (TiCN) у розплав та 0,136% Ni–Y лігатури (табл. 1, позн. 1) та 0,075 і 0,136%, відповідно (позн. 2). Для порівняння відливали зразки, комплексно модифіковані ітрієм та церієм: 0,136% Ni–Y лігатури та 0,03% мішметалу МЦ50Ж6 (позн. 3).

Дослідний метал всіх плавок заливали у керамічні форми, перший робочий шар яких сформований з алюмінату кобальту. Зразки одержували методом рівновісної кристалізації з комплексно модифікованого сплаву дослідних варіантів після ГІП та ТО за стандартним режимом (гомогенізація при $1210 \pm 15^\circ\text{C}$, 4 h, охолодження у повітрі). ГІП виконували так: нагрів до $1210 \pm 10^\circ\text{C}$; витримка 2 h за тиску в камері 160 МПа; охолодження виливків у потоці аргону. Аналізували хімічний склад матеріалу зразків, а також їх макро- та мікроструктуру. Для макроаналізу використали травник 80% HCl та 20% H_2O_2 .

Випробування зразків на ударний згин за Шарпі здійснювали на маятниковому копрі згідно з ДСТУ ISO 148-1:2022, а границю міцності, відносні видовження та звуження визначали згідно з ISO 6892-84 та СТ СЭВ 471-88 на машині ZDM30 за кімнатної температури. Твердість визначали за методом Брінелля (діаметр кульки 10 mm). Тривалу міцність – згідно з вимогами ДСТУ ISO 204:2019 на установці ДСТ-5000 при 850°C і за навантаження 350 МПа до повного руйнування зразків. Механічні властивості під час розтягу та тривалу міцність встановлювали на циліндричних зразках діаметром 12 mm, а ударну в'язкість – на зразках перерізом $12 \times 12 \text{ mm}$.

Результати та їх обговорення. Вміст хімічних елементів у комплексно модифікованому сплаві ЖСЗДК-ВІ трьох дослідних варіантів відповідає вимогам ОСТ 1.90.126-85, з урахуванням 0,0094... 0,0098 mass% ітрію в металі (табл. 1). Досліджували макроструктуру у поперечному перерізі фрагментів блоку зразків, вирізаних з нижньої їх частини (рис. 1). Виявили, що розмір макрозерен в модифікованому за варіантом 3 сплаві в ~ 1,5 рази більший, ніж за варіантами 1 та 2. Найменший розмір зерна на макротемплеті 2 (табл. 2).

Таблиця 1. Хімічний склад сплаву ЖСЗДК-ВІ

Вміст елементів, mass%	1	2	3	ОСТ 1.90.126-85
C	0,075	0,075	0,085	0,06...0,11
Cr	11,6	11,8	11,8	11...12,5
Co	8,7	8,75	8,8	8...10
W	3,8	3,95	3,9	3,8...4,5
Al	4,6	4,5	4,6	4...4,8
Ti	2,8	2,9	2,8	2,5...3,2
Mo	3,8	3,88	3,8	3,8...4,5
Fe	0,1	0,1	0,1	≤ 2
Si	0,08	0,1	0,07	≤ 0,4
Mn	0,0056	0,0050	0,0055	≤ 0,4
S	0,0055	0,0048	0,0048	≤ 0,01
P	< 0,005	< 0,005	< 0,005	≤ 0,015
Y	0,0098	0,0097	0,0094	—
Ni	Решта			

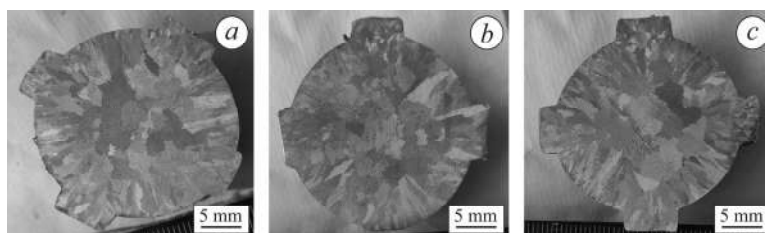


Рис. 1. Макроструктура у поперечному перерізі фрагментів блоку зразків із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ варіантів 1 (а), 2 (б) і 3 (с).

Fig. 1. Macrostructure in the cross-section of fragments of a block of samples from the complex-modified ЖСЗДК-ВІ alloy of experimental options 1 (a), 2 (b) and 3 (c).

Таблиця 2. Параметри макроструктури фрагментів блоку зразків, відлитих зі сплаву ЖСЗДК-ВІ

Варіант	Розмір кристалізаційних зон, mm		Розмір макрозерна, mm
	стовпчастих кристалів	рівновісних кристалів	
1	7,5...10,5	16...22	1,5...5
2	6,5...10	17...24	1...3,5
3	8...11,5	14...21	3...7

Механічні властивості та тривала міцність усіх варіантів дослідних зразків сплаву після ГП та стандартної ТО відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85 (табл. 3). Ударна в'язкість зразків варіанта 3 (без карбонітриду титану) майже вдвічі нижча, ніж варіантів 1 і 2, а також не задовольняє регламентовані вимоги до відповідальних литих авіаційних виробів.

Таблиця 3. Механічні та жароміцні властивості зразків, виготовлених зі сплаву ЖСЗДК-ВІ після ГП та ТО при 20°C

Варіант	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$KCU, J/cm^2$	HB	Середній час до руйнування, τ_d, h
	МПа		%				
1	1175	853	17,6	20,4	5,03	341	283
2	1140	853	18	22	5,13	341	310,5
3	1175	859	18,2	19	2,62	341	182
Норми ОСТ 1.90.126-85	≥ 950	–	≥ 7	–	≥ 3	–	≥ 50

Після випробувань на удар у зразках, відлитих з комплексно модифікованого сплаву, для всіх варіантів присутні в'язкі злами (рис. 2).

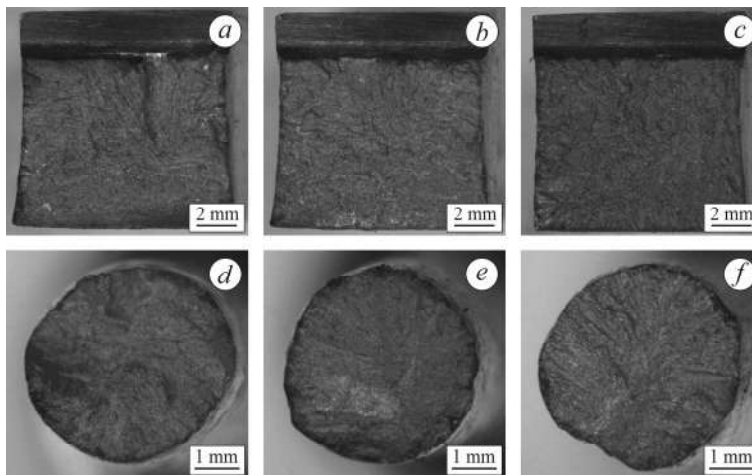


Рис. 2. Злами зразків після випробувань на удар (a–c) та розтяг (d–f) комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ варіантів 1 (a, d), 2 (b, e) та 3 (c, f).

Fig. 2. Fracture surface of specimens after impact test (a–c) and tensile test (d–f) from the complex modified ЖСЗДК-ВІ alloy of options 1 (a, d), 2 (b, e) and 3 (c, f).

Встановили, що у сплаві, отриманому за варіантом 2, карбіди і карбонітриди виділяються у вигляді дискретних глобулярних частинок розміром $\sim 3 \mu m$, які переважно рівномірно розподілені в об'ємі металу (рис. 3b). У зразках, відлитих за варіантами 1 і 3, карбіди виділяються у вигляді як дискретних глобулярних частинок Me_6C , так і пластин, характерних для евтектичних карбідів типу Me_6C . При цьому довжина пластин для варіанта 1 становить $\sim 8 \mu m$ (рис. 3a), для варіанта 3 – $\sim 30 \mu m$ (рис. 3c).

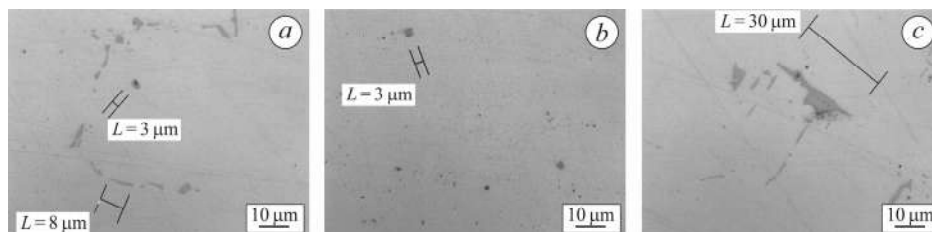


Рис. 3. Морфологія та розподіл карбідів та карбонітридів у зразках з комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ варіантів 1 (a), 2 (b) і 3 (c).

Fig. 3. Morphology and distribution of carbides and carbonitrides in samples from the complex modified ЖСЗДК-ВІ alloy of options 1 (a), 2 (b) and 3 (c).

Мікроструктура зразків сплаву після ГП і ТО – γ -твердий розчин, зміцнений інтерметалідною γ' -фазою з карбідами і карбонітридами, і відповідає мікроструктурі нормально термообробленого сплаву. Слідів перегріву не зафіксували (рис. 4a, d, b, e).

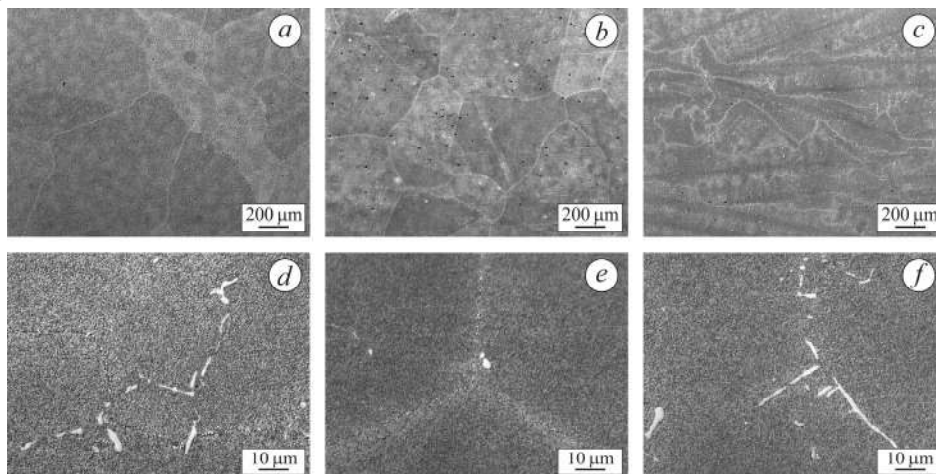


Рис. 4. Мікроструктура зразків із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ варіантів 1 (a, d), 2 (b, e) та 3 (c, f).

Fig. 4. Microstructure of samples from the complex modified ЖСЗДК-ВІ alloy of options 1 (a, d), 2 (b, e) and 3 (c, f).

При цьому у мікроструктурі зразків варіанта 2 межі зерен тонкі з розміром карбідів не більше 2 μm (рис. 4b, e), варіанта 1 грубіші через виділення видовжених карбідів розміром до $\sim 8 \mu\text{m}$ (рис. 4a, d), а варіанта 3 характеризується крупнішим зерном з глобулярними і подовгуватими карбідами завдовжки до $\sim 30 \mu\text{m}$ (рис. 4c, e). Крім того, у мікроструктурі сплаву, модифікованого за варіантом 3 (після ГП і ТО), поряд з основними складниками виявили оплавлену евтектичну (γ - γ')-фазу розміром до $\sim 12,5 \mu\text{m}$, що не відповідає прийнятій шкалі мікроструктур (рис. 5). Отже, можна припустити, що незадовільна мікроструктура обумовлена зниженням температури солідуса сплаву, модифікованого за варіантом 3, ймовірно, через легкоплавкі домішки у складі евтектики. Під час ГП у зразках, відлитих за всіма варіантами, мікропори і пухкості, розташовані в об'ємі металу (на поверхню зразка не виходять), заліковуються. У структурі зразків після ГП мікропори практично відсутні, що сприяє стабілізації структури і властивостей матеріалу.

Рис. 5. Оплавлення евтектичної (γ - γ')-фази у зразках з комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ, відлитих за варіантом 3.

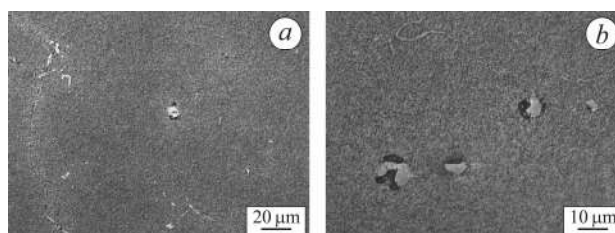


Fig. 5. Melting of the eutectic (γ - γ')-phase in samples from the complex modified ЖСЗДК-ВІ alloy, cast according to option 3.

ВИСНОВКИ

Вміст хімічних елементів у комплексно модифікованому сплаві ЖСЗДК-ВІ трьох дослідних варіантів відповідає вимогам ОСТ 1.90.126-85, з урахуванням 0,0094...0,0098 mass% ітрію в металі. Механічні властивості та тривала міцність

дослідних зразків усіх варіантів після ГП та стандартної ТО відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85. Ударна в'язкість зразка варіанта 3 (без карбонітриду титану) майже вдвічі нижча, ніж варіантів 1 і 2, і також не задовольняє регламентовані вимоги до відповідальних литих авіаційних виробів, які висуває розробник. Максимальний модифікувальний ефект отримано під час комплексного модифікування сплаву за варіантом 2, де зафіксували подрібнення зерна; виділення карбідів і карбонітридів у вигляді дискретних глобулярних частинок, які переважно рівномірно розподілені в об'ємі металу; межі зерен тонкі з розміром карбідів не більше 2 μm . Це, ймовірно, сприяло підвищенню ударної в'язкості до 5,88 J/cm^2 . У мікроструктурі зразків варіанта 1 межі зерен грубіші через виділення подовгуватих карбідів розміром до $\sim 8 \mu\text{m}$; при цьому значення ударної в'язкості не перевищувало 5,13 J/cm^2 . Огрубіння структури зразків за варіантом 3, що характеризується крупнішим зерном з глобулярними і подовгуватими карбідами довжиною до $\sim 30 \mu\text{m}$, ймовірно, сприяло зниженню ударної в'язкості до 2,2...2,9 J/cm^2 . Під час ГП у зразках, відлитих за всіма варіантами, мікропори і пухкості, розташовані в об'ємі металу (на поверхню зразка не виходять), заліковуються. У структурі зразків після ГП мікропори практично відсутні, що сприяє стабілізації структури і властивостей матеріалу.

1. *Badeer G. H. GE Aeroderivative Gas Turbines. Design and Operating Features // GE Power Systems. – Evendale, 2000. – 20 p.*
2. *Федоров О. Г. Газові турбіни і газотурбінні установки: навч. пос. – Одеса: ОНАХТ, 2013. – 126 с.*
3. *Газотурбобудування в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку / А. А. Халатов, К. А. Ющенко, Б. В. Ісаков, Ю. Я. Дашевський, А. П. Шевцов // Вісник НАН України. – 2013. – № 12. – С. 40–49.
<https://www.visnyk-nanu.org.ua/sites/default/files/files/Visn.2013/12/7.Khalatov.pdf>.*
4. *Reed R. C. The Superalloys Fundamentals and Applications. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – P. 23. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>*
5. *High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and γ -TiAl alloys / M. Perrut, P. Caron, M. Thomas, and A. Couret // Comptes Rendus, Physique. – 2018. – 8, № 19. – P. 657–671. DOI:10.1016/j.crhy.2018.10.002*
6. *Satyanarayana D. V. V. and Prasad N. E. Nickel-based superalloys // Aerospace Materials and Material Technologies. Vol. 1: Aerospace Materials. – Singapore: Springer Nature, Pte Ltd., 2017. – P. 199–228. DOI:10.1007/978-981-10-2134-3_9*
7. *Хричиков В. С., Меняйло О. В. Ливарне виробництво чорних та кольорових металів: навч. пос. – Дніпропетровськ: Нац. металургійна акад. України, 2013. – 88 с.*
8. *Квасницька Ю. І. Підвищення експлуатаційних характеристик жароміцних корозійно-стійких сплавів на нікелевій основі і розробка технології одержання лопаток ГТД: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – К.: ФТІМС НАН, 2018. – 46 с.*
9. *Greshita V. L. Structural liability of sheet-rolled corrosion-resistant ferritic steels to a plastic deforming // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2017. – 39, № 9. – P. 1213–1225. <https://doi.org/10.15407/mfint.39.09.1213>*
10. *Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного лиття: підр. для вищих уч. закладів / В. О. Богуслаєв, С. І. Репях, В. Г. Могилаєнко, З. А. Івченко, М. О. Матвєєва. – Запоріжжя: АТ “Мотор Січ”, 2016. – 474 с.*
11. *Microstructural evolution of single crystal and directionally solidified rejuvenated nickel superalloys / A. Rowe, J. Wells, G. D. West, and R. C. Thomson // Superalloys 2012: 12th Int. Symp. on Superalloys. – 2012. – P. 245–254. DOI: 10.1002/9781118516430.ch27*
12. *Crystallization processes, structure and properties of Ni superalloy castings / É. I. Tsvirko, P. D. Zhemanyuk, V. V. Klochikhin, V. V. Naumik, and V. V. Lunev // Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov. – 2001. – № 10. – P. 13–17.*
13. *Structural and phase transformations in single-crystal rhenium- and ruthenium-alloyed nickel alloy under testing for long-term strength / V. P. Kuznetsov, V. P. Lesnikov, I. P. Konakova, N. A. Popov, and Yu. G. Kvasnitskaya // Metal Sci. and Heat Treatment. – 2015. – 57, № 7–8. – P. 503–506. DOI: 10.1007/s11041-015-9912-4*

14. Vaporization of Ni, Al and Cr in Ni-base alloys and its influence on surface defect formation during manufacturing of single-crystal components / Z. H. Dong, D. Sergeev, D. Kobertz, N. D'Souza, S. Feng, M. Müller, and H. B. Dong // *Metallurgical and Mat. Transact. A.* – 2020. – **51**, № 1. – P. 309–322. DOI: 10.1007/s11661-019-05498-1
15. Wahl J. B. and Harris K. CMSX-4® Plus Single Crystal Alloy Development, Characterization and Application Development // *Superalloys.* – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016. – P. 25–33. DOI: 10.1002/9781119075646.ch3
16. Development of an Oxidation-Resistant High-Strength Sixth-Generation Single-Crystal Superalloy TMS-238 / K. Kawagishi, A.-C. Yeh, T. Yokokawa, and T. Kobayashi // *Superalloys.* – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2012. – P. 189–195. DOI: 10.1002/9781118516430.ch21
17. Erickson G. L. The development of the CMSX-11B and CMSX-11C alloys for industrial gas turbine application // *Superalloys.* – 1996. – P. 45–62.
18. Wahl J. B. and Harris K. New single crystal superalloys, CMSX®-7 and CMSX®-8 / Eds.: E. S. Huron et al. // *Superalloys.* – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2012. – P. 179–188. DOI: 10.1002/9781118516430.ch20
19. Milonin E. and Naumyk V. Rhenium-Free Heat-Resistant Nickel Alloy for the Cast Blades Production // *TMS 2024 153rd Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings.* TMS 2024. The Minerals, Metals & Materials Series. – Cham: Springer, 2024. – P. 1707–1712. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50349-8_146
20. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. пос. / За ред. акад. НАН України В. Л. Найдєка. – К.: Вид. дім “Вініченко”, 2016. – 224 с.
21. Klochikhin V. and Naumyk V. Improvement of technological processes obtaining a heat-resistant nickel alloys for turbine blades using foundry return // *Mat. Sci. and Techn.* – 2019. – P. 1454–1458.
22. Sanchugov Y. L., Koval A. D., and Belikov S. B. Some peculiarities of alloying of nickel superalloys resistant to high-temperature corrosion // *NACE, Int. Corr. Conf.* – 2012. – Ser. 4. – P. 3435–3438.
23. Influence of chloride-containing media on the pitting resistance of AISI 321 steel / O. E. Narivskiyi, S. B. Belikov, S. A. Subbotin, and T. V. Pulina // *Materials Science.* – 2021. – **57**, № 4. – P. 291–297. DOI:10.1007/s11003-021-00544-z
24. Ресурсозберігаючі технології виробництва литва для авіаційного двигунобудування / В. О. Богуслаєв, К. Б. Балушок, В. В. Ключихін, Є. В. Мілонін, В. В. Наумик, В. А. Шаломєєв. – Запоріжжя: АТ “Мотор Січ”, 2021. – 198 с.
25. Yunsong Zhao, Siliang He, and Longfei Li. Application of hot isostatic pressing in nickel-based single crystal superalloys // *Crystals.* – 2022. – **6**, № 12. – P. 805. <https://doi.org/10.3390/cryst12060805>
26. Hot isostatic pressing improves the quality of the blades from nickel base superalloys for turbine engines / I. M. Razumovskii, A. A. Tikhonov, S. F. Marinin, and A. V. Logunov // *Adv. Mat. Res.* – 2011. – **278**. – P. 295–300. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.278.295
27. Jun Wang and Zhaojun Jiang. Application research progress of hot isostatic pressing technology in nickel-based singlecrystal superalloy // *E3S Web of Conf. The 2nd Int. Symp. on Hydrogen Energy and Energy Technologies (HEET 2019).* – 2020. – **155**. – Article Number: 01012. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015501012>
28. Klochihin V., Lysenko N., and Naumyk V. Structure and properties of heat-resistant nickel alloys castings after hot isostatic pressing // *Mat. Sci. and Techn. Conf. and Exhibition.* – 2017. – **2**. – P. 1370–1374.
29. Hot isostatic pressing in the manufacture of ZhS3DK-VI alloy turbine blades with 50% returns in the charge / V. V. Klochykhin, O. O. Pedash, S. M. Danilov, D. O. Tyomkin, O. O. Naumyk, and V. V. Naumyk // *Strength of Mater.* – 2022. – **54**, № 6. – P. 1043–1049. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00479-7>
30. Structure and properties of cast blades made of ZhS3DK-VI alloy modified with nickel-yttrium ligature / D. O. Tomkin, O. O. Pedash, S. M. Danilov, V. V. Klochikhin, O. O. Naumyk, and V. V. Naumyk // *Materials Science.* – 2024. – **59**, № 4. – P. 480 – 486.

Одержано 05.02.2024