

УДК 620.17:620.1:669.245

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛИТИХ ЛОПАТОК ЗІ СПЛАВУ ЖСЗДК-ВІ, МОДИФІКОВАНОГО НІКЕЛЕВО-ІТРИЄВОЮ ЛІГАТУРОЮ

Д. О. ТЬОМКІН¹, О. О. ПЕДАШ², С. М. ДАНИЛОВ¹, В. В. КЛОЧИХІН³,
О. О. НАУМИК³, В. В. НАУМИК³

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

² АТ "Мотор Січ", Запоріжжя;

³ Національний університет "Запорізька політехніка"

Досліджено структуру та властивості робочих лопаток, відлитої зі жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого нікелево-ітрієвою лігатурою ІТН-1, в литому та стандартно термообробленому станах, а також після гарячого ізостатичного пресування (ГІП) та подальшої термічної обробки. Встановлено, що хімічний склад, а також механічні та жароміцні властивості матеріалу дослідних литих лопаток як без, так і з ГІП задовільні і відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85. У пері та хвостовику лопатки без ГІП виявлено скупчення усадкової пухкості та окремі мікропори розміром до ~ 180 і 117 μm, відповідно. Кут згину дослідних лопаток після ГІП та стандартної термічної обробки становить 105...115° (без тріщин). Під час ГІП при 1210°C і за тиску 160 МПа мікропори і пухкості, що не виходять на поверхню деталей (розташовані у внутрішніх обсягах металу), заліковуються. У структурі лопаток після ГІП мікропори практично відсутні, що сприяє стабілізації структури та властивостей матеріалу. Розмір поодиноких мікропор у місцях зосередження грубої пухкості до модифікування не перевищує 30 μm.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, лита лопатка, хімічний склад, модифікування, ітрій, гаряче ізостатичне пресування, макро- і мікроструктура, механічні властивості.

The structure and properties of the working cast blade of the heat-resistant ЖСЗДК-ВІ nickel alloy, modified with nickel-yttrium ligature ІТН-1, in the cast and standard heat-treated states, as well as after hot isostatic pressing (HIP) and subsequent heat treatment, were studied. It was established that the chemical composition, as well as the mechanical and heat-resistant properties of the material of the experimental cast blades, both without and after the HIP, are satisfactory and meet the requirements of standard OST 1 90126-85. In the feather and shank of the blade without HIP, an accumulation of shrinkage friability and microporosity up to ~ 180 and 117 μm, respectively, were found. The bending angle of the experimental blades after the HIP and standard heat treatment is 105...115° (without the formation of cracks). In the process of HIP at a temperature of 1210°C and a pressure of 160 MPa micropores and coarse particles that do not reach the surface of the parts (located in the internal volumes of the metal) are healed. Micropores are practically absent in the structure of the examined blades after HIP, which contributes to the stabilization of the structure and properties of the material. The size of the single micropores present after the HIP, detected in the places of coarse debris concentration before the HIP operation, does not exceed 30 μm.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, cast blade, chemical composition, modification, yttrium, hot isostatic pressing, macro- and microstructure, mechanical properties.

Вступ. Під час створення нових і модернізації існуючих силових авіаційних та енергетичних установок з підвищеними характеристиками і ресурсом висувають нові вимоги до деталей гарячого тракту [1–4], які, як правило, виготовляють сучасними методами лиття із жароміцних сплавів [5–9]. Перспективний напрямок поліпшити структуру, фізико-механічні та експлуатаційні властивості ливарних сплавів – керування структуротворенням шляхом оптимізації їх складу, рафінування та модифікування [10–13].

Встановлено, що різні способи модифікування, в т.ч. рідкісноземельними і лужними металами [14–16], відіграють важливу роль у формуванні структури та забезпеченні властивостей жароміцних сплавів і в поєднанні з плавленням і рафінуванням визначають характер кристалізації та ступінь зернистості структури [16–19]. Проте, не з'ясовано як комплексно їх використовували.

Перспективним методом заліковування ливарних дефектів, що неминуче утворюються під час тверднення і кристалізації виливків з високолегованих жароміцних нікелевих сплавів, є гаряче ізостатичне пресування (ГІП) [20–24], коли під одночасним впливом високих температур і тиску відбуваються змикання стінок внутрішніх порожнин та їх дифузійне зварювання [20, 24].

Найпоширенішим сьогодні методом рівновісної кристалізації зі сплаву ЖСЗДК-ВІ виготовляють литі лопатки вентиляторних турбін, що працюють при температурах до 900°C [25]. Нижче вивчено вплив модифікування сплаву рідкісноземельними металами в поєднанні з іншими методами на структуру та властивості литих лопаток.

Матеріали та методи випроб. Випробовували робочі лопатки третього ступеня турбіни вентилятора зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого нікелево-ітрієвою лігатурою ІТН-1, в литому та стандартно термообробленому стані, а також після ГІП та подальшої термічної обробки. Температуру під час ГІП обирали максимально високою, але щоб не допустити оплавлення структури матеріалу, а тиск, – враховуючи відомі результати про властивості сплаву за обраної температури, щоб забезпечити пластичну деформацію до змикання стінок внутрішніх порожнин та подальшого дифузійного зварювання поверхонь [25].

ГІП виконували за таким режимом: початковий тиск у камері 38 МПа; нагрівання від кімнатної температури до $1040 \pm 10^\circ\text{C}$ зі швидкістю $8...10^\circ\text{C}/\text{min}$; витримка при $1040 \pm 10^\circ\text{C}$, 1,5 h за тиску в камері 120 МПа; нагрівання до температур $1210 \pm 10^\circ\text{C}$ зі швидкістю $4^\circ\text{C}/\text{min}$; витримка при $1210 \pm 10^\circ\text{C}$, 2 h за тиску в камері 160 МПа; охолодження виливків до температури 300°C зі швидкістю $26^\circ\text{C}/\text{min}$.

Термічно обробляли за стандартним режимом (гомогенізація при $1210 \pm 10^\circ\text{C}$, 4 h з охолодженням у повітрі). Проаналізували загальний вигляд лопаток. Визначали хімічний склад матеріалу, а також макро- та мікроструктуру робочих лопаток та зразків. Макроструктуру – методом хімічного травлення в реактиві з 80% HCl та 20% H₂O₂. Лопатки на згин випробовували на ручному гвинтовому пресі згідно з ГОСТ 14019-80, використовуючи спеціальні пристрої з V-подібним заглибленням.

Механічні властивості за кімнатної температури (границю міцності, відносні видовження та звуження) визначали згідно зі стандартами ISO 6892-84 та СТ СЭВ 471-88. Для випробувань на розрив використовували машину ZDM30, а на ударний згин за Шарпі – маятниковий копр згідно зі стандартом ISO 148-1:2022. Тривалу міцність за стандартом ISO 204:2019 досліджували на установці ДСТ-5000 при 850°C і за навантаження 350 МПа до повного руйнування. Механічні властивості за розтягу визначали на циліндричних зразках діаметром 12 mm, а ударну в'язкість та міцність – на зразках з перерізом 12×12 mm.

Результати та їх обговорення. Хімічний склад дослідних лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого лігатурою ІТН-1, відповідає вимогам ОСТ 1.90.126-85 (табл. 1).

Таблиця 1. Хімічний склад матеріалу дослідних лопаток

№ лопатки	Вміст елементів, mass%										
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Si	Mn	S
1	0,095	11,60	9,30	4,20	4,30	2,70	3,90	0,12	<0,4	<0,4	0,0048
2	0,090	12,10	9,20	4,30	4,30	2,60	3,80	0,08	<0,4	<0,4	0,0045
Норми ОСТ 1.90.126-85	0,06... 0,11	11... 2,5	8,0... 10,0	3,8... 4,5	4,0... 4,8	2,5... 3,2	3,8... 4,5	≤2,0	≤0,4	≤0,4	≤0,015

Макроструктура робочих лопаток турбіни третього ступеня зі сплаву, модифікованого лігатурою ІТН-1, в литому стані та після ГПІ ідентична (рис. 1).

Рис. 1. Макроструктура поверхні робочих лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого лігатурою ІТН-1: I-IV – місця їх перерізів.

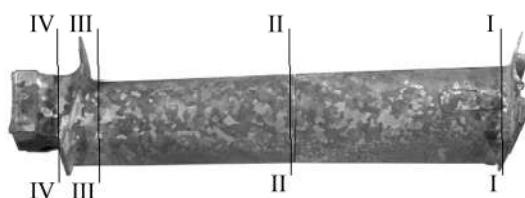


Fig. 1. Macrostructure of the working blades surface made of the ЖСЗДК-ВІ alloy modified with the ligature ITN-1: I-IV – sites of their cross-sections.

Випробовували дослідні робочі лопатки на згин. Кут згину, який вимірювали після зняття навантаження, становив від 105 до 115°, що відповідає вимогам ОСТ 1.90.126-85 (рис. 2). Тріщин в зоні згину не виявили (рис. 2b).

Рис. 2. Загальний вигляд робочих лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ після випробувань на згин (a) та зона згину під кутом 115° (b) після модифікації лігатурою ІТН-1 з ГПІ і стандартною термообробкою.

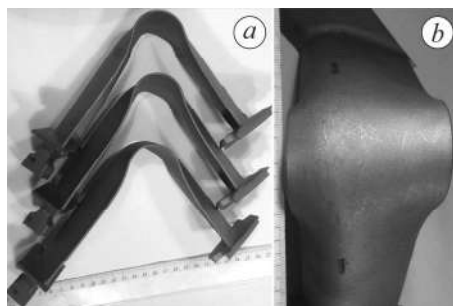


Fig. 2. General view of working blades made of the ЖСЗДК-ВІ alloy after bending test (a) and the bending zone at an angle of 115° (b) after modification with ITN-1 ligature with HIP and standard heat treatment.

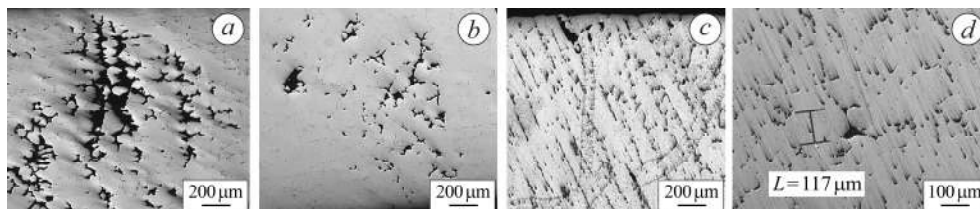


Рис. 3. Усадкові мікропори у пері та хвостовику робочої лопатки (без ГПІ) відповідно у перерізах I (a), II (b), III (c) та IV (d).

Fig. 3. Shrinkage microporosity in the working blade feather and shank (without HIP) in sections I (a), II (b), III (c) and IV (d), respectively.

Макроструктуру сплаву лопаток (як без, так і після ГП) досліджували у трьох перерізах (I, II, III) за висотою пера лопатки та в її хвостовику (IV) (див. рис. 1). У пері та хвостовику без ГП зафіксували скупчення усадкової пухкості та мікропори розміром до ~ 180 та $117 \mu\text{m}$, відповідно (рис. 3). Крім того, на поверхні пера лопатки без ГП (переважно від корита) зафіксували мікропори зі слідами зональної взаємодії матеріалу лопатки з лігатурою ІТН-1, що проникають на глибину $\sim 0,16 \text{ mm}$ (рис. 4).

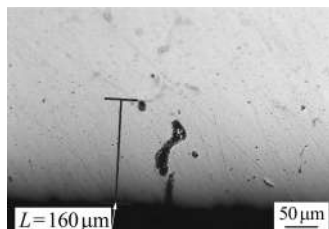


Рис. 4. Мікропори зі слідами зональної взаємодії матеріалу лопатки з модифікатором (лігатурою ІТН-1) у пері робочої лопатки (без ГП).

Fig. 4. Micropores with traces of zonal interaction of the blade material with the modifier (ligature ITN-1) in the feather of the working blade (without HIP).

Металографічними дослідженнями встановили, що мікроструктура лопатки, відлитої з модифікованого лігатурою сплаву, типова дендритна (γ -твердий розчин з γ' -фазою, евтектики ($\gamma-\gamma'$) карбідів і карбонітридів) (рис. 5), як і серійного сплаву. Первинні карбіди виділяються як у вигляді дискретних поліедричних частинок, так і як пластини шрифтової морфології і розташовані у міждендритних просторах та межами зерен. Порівнюючи перо лопатки з хвостовою частиною, виявили, що за розмірами карбіди, мікропори, а також дендритний осередок відрізняються несуттєво (рис. 5d, h).

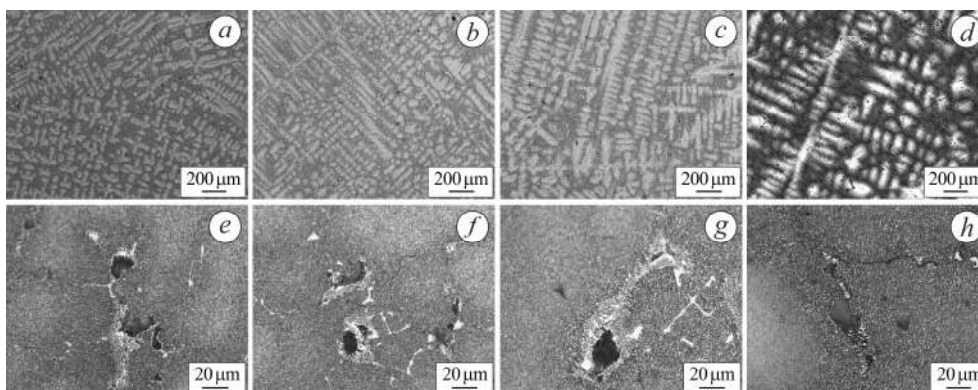


Рис. 5. Мікроструктура пера лопатки в литому стані в перерізах I (a, e), II (b, f), III (c, g) та хвостової частини в перерізі IV (d, h).

Fig. 5. Microstructure of the blade feather in the cast state in the cross-sections I (a, e), II (b, f), III (c, g) and the shank part in the cross-section IV (d, h).

ГП сприяє залікуванню пор та пухкості у матеріалі лопатки. Тому тут вони практично відсутні (рис. 6).

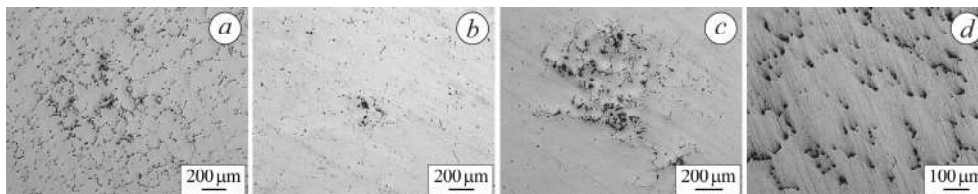


Рис. 6. Структура перерізів пера I (a), II (b), III (c) та хвостовика IV (d) робочої лопатки зі сплаву ЖСЗДК-ВІ після ГП.

Fig. 6. Structure cross-sections of the feather I (a), II (b), III (c) and the shank IV (d) of the ЖСЗДК-ВІ alloy working blade after HIP.

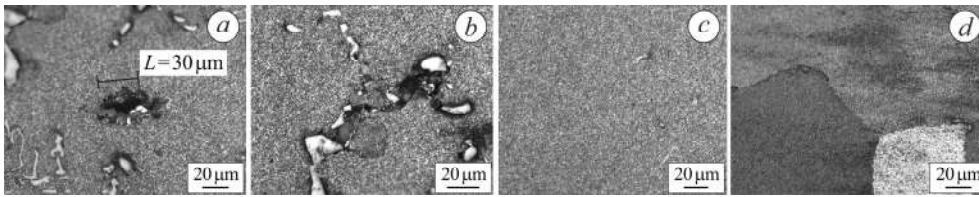


Рис. 7. Мікроструктура пера робочої лопатки (a, b) та її хвостовика (c, d) зі сплаву ЖСЗДК-ВІ після ГПІ.

Fig. 7. Microstructure of the working blade feather (a, b) and its the shank made of ЖСЗДК-ВІ alloy (c, d) after HIP.

Розмір поодиноких мікропор після ГПІ не перевищує 30 μm (рис. 7a). Крім того, в місцях заліковування пор і пухкостей спостерігали коагуляцію частинок γ -фази, а також поодинокі ділянки з фазою (γ - γ'), що не розчинилася (рис. 7b). Мікроструктурний аналіз засвідчив, що під час ГПІ при 1210 $^{\circ}\text{C}$ та за тиску 160 МПа фаза (γ - γ') практично повністю розчинилася у γ -матриці. Мікроструктура матеріалу лопатки після ГПІ та подальшої стандартної термообробки практично однакова і відповідає прийнятій шкалі. Структури, характерні для перегрітого стану, не вивили (рис. 7c, d). Результати механічних досліджень зразків з модифікованого лігатурою ІТН-1 сплаву наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Механічні та жароміцні властивості робочих лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ після різного оброблення

Стан сплаву	Механічні властивості при $T = 20^{\circ}\text{C}$				τ_{fract} , h
	σ_B , МПа	δ	Ψ	KCU , J/cm^2	
		%			
Модифікування ІТН-1 + + термічна обробка	1184	18,8	19,9	3,88	401,8
Модифікування ІТН-1+ГПІ + + термічна обробка	1218	20,0	16,0	3,84	427, 5
Норми ОСТ 1.90.126-85	≥ 950	$\geq 7,0$	–	$\geq 3,0$	$\geq 50,0$

Отже, механічні та жароміцні властивості досліджуваних зразків як без, так і після ГПІ відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85.

Мікроструктура пальчикових зразків з діаметром або стороною квадрата 12 mm у перерізі після ГПІ та подальшої термообробки за стандартним режимом така ж, як і лопаток, оброблених за вказаним режимом.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що хімічний склад, механічні та жароміцні властивості матеріалу робочих лопаток третього ступеня турбіни вентилятора, відлитих зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого лігатурою ІТН-1 (як без, так і після ГПІ) відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85. Кут їх згину після ГПІ та стандартної термічної обробки, становить 105...115 $^{\circ}$ (без тріщин). ГПІ заліковує мікропори та пухкості. До ГПІ фіксували усадкові пухкості та мікропори розміром до ~ 180 і $117 \mu\text{m}$ у пері та хвостовику лопатки, відповідно, а після – поодинокі мікропори розміром не більше 30 μm , що сприяло стабілізації структури та властивостей матеріалу. Виявлено позитивний вплив модифікування сплаву лігатурою ІТН-1 у комплексі з ГПІ та стандартною термічною обробкою для забезпечення стабільності струк-

тури, поліпшення властивостей та експлуатаційної надійності відповідальних литих виробів для авіаційного та енергетичного машинобудування.

1. *Reed R. C.* The Superalloys Fundamentals and Applications. – Cambridge: Cambridge University Press., 2006. – P. 23. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>
2. *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
3. *Satyanaarayana 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
4. *Хричиков В. С., Меняйло О. В.* Ливарне виробництво чорних та кольорових металів: навч. пос. – Дніпропетровськ: Нац. металургійна акад. України, 2013. – 88 с.
5. *Erickson G. L.* The development of the CMSX-11B and CMSX-11C alloys for industrial gas turbine application // *Superalloys*. – 1996. – P. 45–62.
6. *Greshtha 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>
7. *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
8. *Badeer G. H.* GE Aeroderivative Gas Turbines. Design and Operating Features / GE Power Systems. – Evendale: Ohio, 2000. – 20 p.
9. *Microstructural evolution of single crystal and directionally solidified rejuvenated nickel superalloys* / A. Rowe, J. Wells, G. D. West, and R. C. Thomson // *Superalloys*. – 2012. – P. 245–254. DOI:10.1002/9781118516430.ch27
10. *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
11. *Crystallization processes, structure and properties of castings from high-temperature nickel alloys* / Ё. I. Tsvirko, P. D. Zhemanuk, V. V. Klochikhin, V. V. Naumik, and V. V. Lunev // *Metal Sci. and Heat Treatment*. – 2001. – 43, № 9–10. – P. 382–386. <https://doi.org/10.1023/A:1013648719105>
12. *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
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. *Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Мозилатенко 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. – 223 с.
15. *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 Mater. Transact. A*. – 2020. – 51, № 1. – P. 309–322. DOI:10.1007/s11661-019-05498-1
16. *Klochikhin V. and Naumyk V.* Improvement of technological processes obtaining a heat-resistant nickel alloys for turbine blades using foundry return // *MS and T 2019*. – Mater. Sci. and Techn. – 2019. – P. 1454–1458.
17. *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.
18. *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

19. *Ресурсозберігаючі* технології виробництва литва для авіаційного двигунобудування / В. О. Богуслаєв, К. Б. Балущок, В. В. Клочихін, Є. В. Мілонін, В. В. Наумик, В. А. Шаломєєв. – Запоріжжя: АТ “Мотор Січ”, 2021. – 198 с.
20. *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>
21. *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
22. *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>
23. *Klochihin V., Lysenko N., and Naumyk V.* Structure and properties of heat-resistant nickel alloys castings after hot isostatic pressing // *Mater. Sci. and Techn. Conf. and Exhibition*. – 2017. – **2**. – P. 1370–1374.
24. *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>
25. *Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного лиття: підручник для вищих учбових закладів* / В. О. Богуслаєв, С. І. Репях, В. Г. Могилатенко, З. А. Івченко, М. О. Матвєєва. – Запоріжжя: АТ “Мотор Січ”, 2016. – 474 с.

Одержано 27.02.2023