

УДК 621.74.045:669.24:21.981

В. В. Ключихін, канд. техн. наук, голов. металург;

e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

О. О. Педаш, канд. техн. наук, керівник бюро;

e-mail: tb.ugmet@motorsich.com

С. М. Данилов*, асп., директор; e-mail: m_zmzmotor@ukr.net

Д. О. Тьомкін*, заст. голов. металурга, e-mail: tajdv678@gmail.com

О. О. Наумик**, молод. наук. співроб.,; e-mail: enaumyk@gmail.com

В. В. Наумик**, д-р техн. наук, проф. проректор;

e-mail: vnaumyr@gmail.com; naumik@zp.edu.ua.

АТ «Мотор Січ» (Запоріжжя, Україна)

*Запорізький машинобудівний завод ім. Омельченко В. І. (Запоріжжя, Україна)

**Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

ВИПРАВЛЕННЯ ЛИВАРНИХ ДЕФЕКТІВ У ЛОПАТКАХ ІЗ СПЛАВУ ЖСЗДК-ВІ, МОДИФІКОВАНОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНИМИ ЧАСТИНКАМИ КАРБОНІТРИДУ ТИТАНУ, МЕТОДОМ ГАРЯЧОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПЕРЕСУВАННЯ

Дослідженнями встановлено, що застосування технологічної операції гарячого ізостатичного пресування до лопаток, виготовлених методом рівноосного лиття з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсними частинками $Ti(C, N)$ дозволяє мінімізувати наявність дефектів ливарного походження і таким чином забезпечити необхідний рівень комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей готових виробів. Досліджені робочі лопатки турбіни вентилятора (як до, так і після ГП) за хімічним складом, структурою, механічними і жароміцними властивостями відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85. Значення величини кута загину на досліджених лопатках перебувають в межах $98...107^\circ$. Тріщин немає. В процесі операції гарячого ізостатичного пресування відбувається «заліковування» пір і рихлот. У структурі досліджених лопаток після ГП мікропори та рихлоти практично відсутні. Величина макрозерна в пері досліджуваної лопатки становить $\sim 0,75...2,0$ мм, що в ~ 2 рази менше, ніж у хвостовій частині. У структурі лопаток (як у пері, так і в хвостовику) виявлено скупчення карбонітридних частинок розміром до 16 мкм. Відстань між осями дендритів другого порядку в пері лопаток приблизно в $\sim 1,5$ рази менша, ніж у хвостовій частині.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, робоча лопатка, ультрадисперсні частинки, карбонітрид титану, гаряче ізостатичне пресування, хімічний склад, структура, механічні властивості, жароміцність.

Вступ

Робочі лопатки є найбільш навантаженими і відповідальними деталями вузлів гарячого тракту сучасних силових установок авіаційного та енергетичного машинобудування [1–3]. Їх отримують з високолегованих жароміцних нікелевих сплавів методами лиття за витоплюваними моделями в умовах рівноосної та спрямованої кристалізації [4–6]. Як і всім виробам ливарного виробництва їм притаманна

наявність дефектів ліквацийного та усадкового характеру (мікро- і макроліквація, недосконалість фазового складу, точкові та дислокаційні недосконалості структури, наявність мікропор, усадкових рихлот, таке інше), які призводять до суттєвого зниження рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей [7–9].

Одним з сучасних перспективних способів виправлення низки ливарних дефектів є гаряче ізостатичне пресування (ГІП) [10–12]. Під час технологічної операції ГІП литі вироби піддаються одночасному впливу високих температури та тиску в середовищі газу чи спеціальної рідини. При цьому температуру обирають максимально високу, таку, щоб тільки запобігти оплавленню матеріалу виливка.

Стінки внутрішніх порожнин (пор, внутрішніх усадкових раковин, міждендритних тріщин), які утворилися в процесі затвердіння і кристалізації матеріалу виливка, спочатку за механізмами повзучості і пластичної деформації зникають, а потім відбувається дифузійне зварювання приведених в контакт поверхонь [10]. При цьому видаляються тільки внутрішні дефекти, ті, що не мають сполучення з поверхнею виливка.

В умовах АТ «Мотор Січ» проведено ряд досліджень з вивчення особливостей впливу гарячого ізостатичного пресування на структуру і властивості відповідальних виливків з високолегованих жароміцних нікелевих сплавів, які дозволили підтвердити ефективність методу ГІП для покращення експлуатаційної надійності готових виробів і встановити певні закономірності [11–12].

Одним із найпоширеніших на сьогоднішній день є сплав ЖСЗДК-ВІ, який використовується для виготовлення методом рівноосної кристалізації литих масивних лопаток вентиляторних турбін, що працюють при температурах до 900 °C [1, 2].

Для забезпечення формування оптимальної структури та покращення комплексу фізико-механічних та експлуатаційних властивостей литих виробів широко використовуються різноманітні методи модифікування, в тому числі ультрадисперсними частинками [1, 13]. Для модифікування жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ використовується ультрадисперсний порошок карбонітриду титану. Модифікатор TiCN може вводиться в розплав у вигляді або порошку, або брикетів, як правило, основою при виготовленні останніх є титан [14].

Метою даного дослідження є вивчення впливу гарячого ізостатичного пресування на структуру і властивості литих робочих лопаток, отриманих методом рівноосного лиття з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсними частинками карбонітриду титану [Ti(C,N)].

Матеріали та методика досліджень

Досліджували робочі лопатки третього ступеня турбіни вентилятора, відлиті з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсними частинками карбонітриду титану [Ti(C,N)], що пройшли гаряче ізостатичне пресування (ГІП) і термічну обробку за стандартним режимом (гомогенізація при температурі 1210 ± 10 °C протягом 4 годин у вакуумі).

Для модифікування використовували брикети на основі титану [Ti+Ti(C,N)] у кількості, що забезпечує введення 0,05 % ультрадисперсного матеріалу [Ti(C,N)] від маси шихти.

Процес гарячого ізостатичного пресування проводили за наступним режимом:

- початковий тиск в камері – 38 МПа;
- нагрівання від кімнатної температури до 1040 ± 10 °C зі швидкістю 8...10 °C/хв.;
- витримка при температурі 1040 ± 10 °C – 1,5 години при тиску в камері 120 МПа;
- нагрівання до температури 1210 ± 10 °C зі швидкістю 4°/хв.;
- витримка при температурі 1210 ± 10 °C – 2 години при тиску в камері 160 МПа;
- охолодження виливків до температури 300 °C зі швидкістю 26 °/хв.

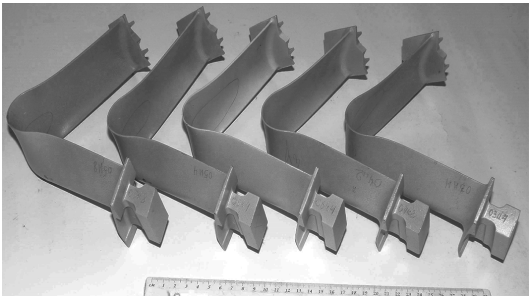
Результати та обговорення

Хімічний склад матеріалу досліджених робочих лопаток відповідає вимогам ОСТ 190126-85 (табл. 1).

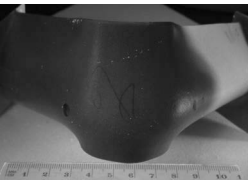
Провели випробування робочих лопаток на згин. Вимірювання кута загину проводилися після зняття навантаження.

Таблиця 1
Хімічний склад робочих лопаток із сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого брикетами [Ti+Ti(C,N)] після операції ГП та стандартної термообробки

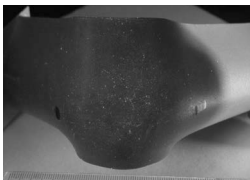
Джерело	Вміст елементів, % за масою										
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Si	Mn	S
Лопатка	0,07	11,80	9,60	4,00	4,25	2,90	4,10	<2,0	<0,4	<0,4	0,004
Норми ОСТ 190126-85	0,06- 0,11	11,0- 12,5	8,0- 10,0	3,8- 4,5	4,0- 4,8	2,5- 3,2	3,8- 4,5	≤ 2,0	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,015



а



б



в

Рис. 1. Зовнішній вигляд робочих лопаток із сплаву ЖСЗДК-ВІ (ГП + стандартна термообробка) після випробування на згин: а – загальний вигляд; б, в – місце згину

Кут загину лопаток становив від 98 до 107°. Тріщини за місцем згину на досліджених лопатках не виявлено. На рис. 1 зображено зовнішній вигляд робочих лопаток після випробування на згин.

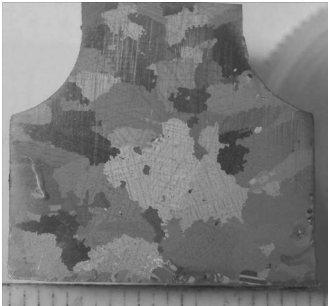
Макроструктуру виявляли методом хімічного травлення в реактиві, що складається з 80 % HCl та 20 % H₂O₂.

Макроструктуру в поперечному перерізі пера та хвостовика лопатки представлено на рис. 2.

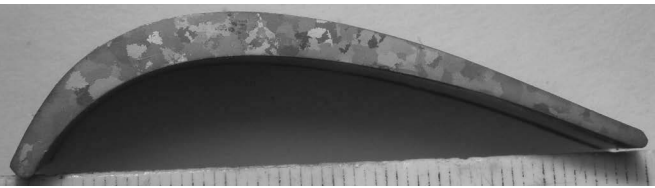
Величина макрозерна в пері досліджуваної лопатки становить ~0,75...2,0 мм, що в ~2 рази менше, ніж у хвостовій частині.

Металографічним дослідженням встановлено, що мікроструктура досліджених робочих лопаток являє собою γ-твердий розчин, зміцнений інтерметалідною

γ'-фазою, з наявністю карбідів і карбонітридів, відповідає модифікованому ультрадисперсними частинками карбонітриду титану сплаву ЖСЗДК-ВІ у нормально термообробленому стані та прийнятій шкалі мікроструктур (рис. 3). Структури, характерні для перегрітого стану у матеріалі досліджуваних лопаток, що пройшли операцію гарячого ізостатичного пресування, не виявлено. У структурі лопаток (як у пері, так і в хвостовику) виявлено скупчення карбонітридних частинок розміром до 16 мкм (рис. 4).



а



б

Рис. 2. Макроструктура у поперечному перерізі хвостовика (а) та пера (б) робочої лопатки після ГП та стандартної термообробки

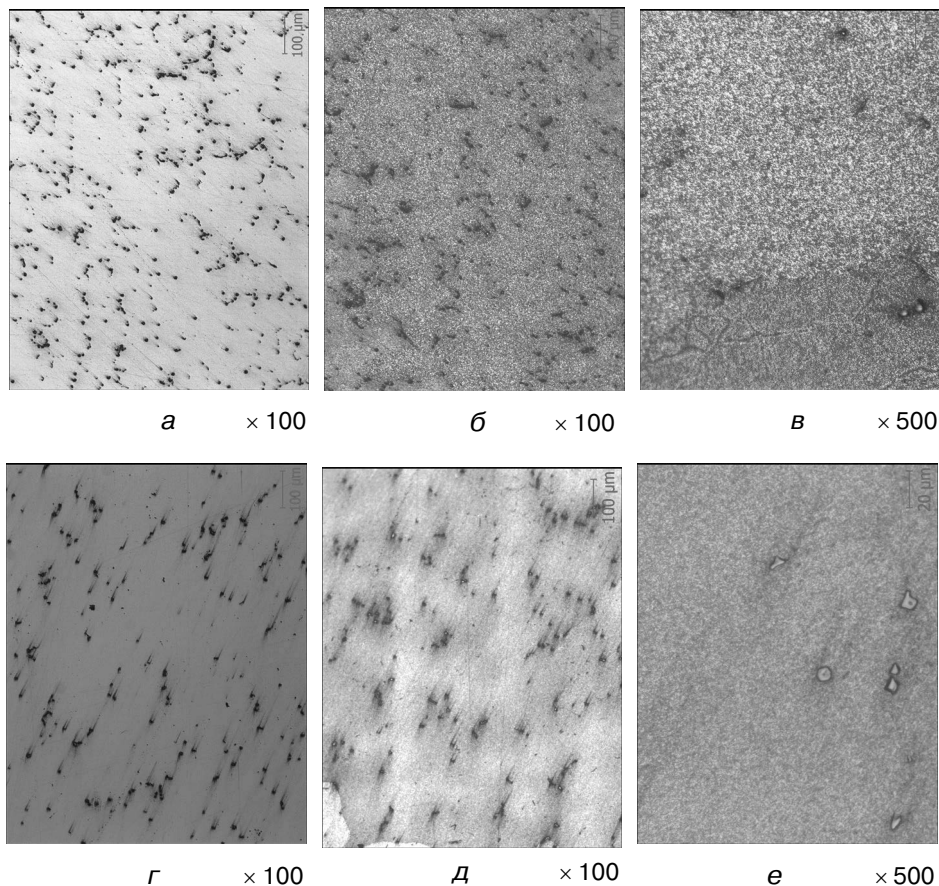


Рис. 3. Мікроструктура робочих лопаток (ГП + стандартна термообробка) після випробування на згин: а, б, в – перо; г, д, е – хвостовик

Відстань між осями дендритів другого порядку в пері лопаток приблизно в $\sim 1,5$ рази менша, ніж у хвостовій частині.

Проведення операції гарячого ізостатичного пресування сприяє «заліковуванню» пор та рихлот (рис. 5). У структурі досліджених лопаток після ГП мікропори та рихлоти практично відсутні (див. рис. 3). Розмір виявлених після ГП поодиноких мікропор становить ~ 9 мкм (табл. 2).

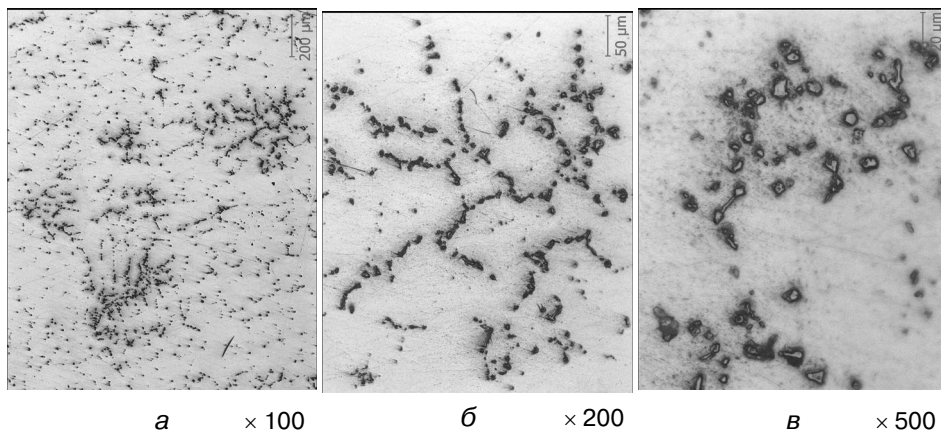


Рис. 4. Скупчення частинок $[Ti(C,N)]$ у матеріалі робочих лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого $[Ti+Ti(C,N)]$, після ГП та стандартної термообробки

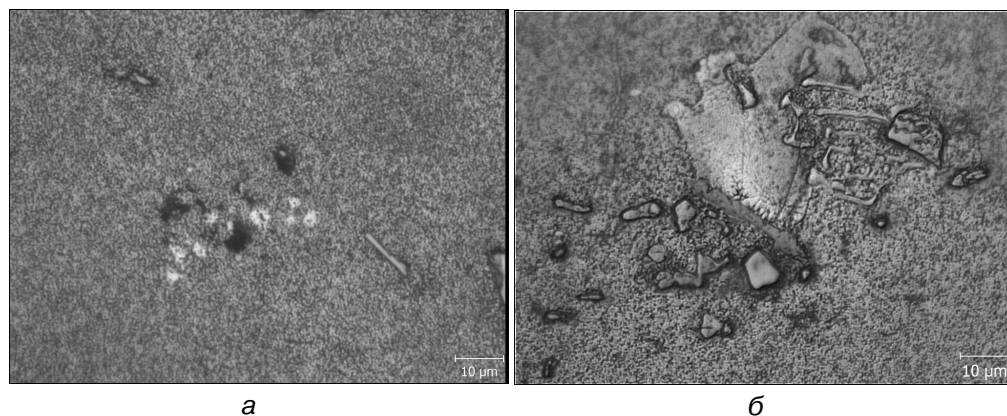


Рис. 5. Мікроструктура в зонах «заліковування» мікропор (а) та рихлот (б) у матеріалі робочих лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ після ГІП та стандартної термообробки, $\times 1000$.

Слід зазначити, що «заліковування» мікропор та усадкової рихлоти, що виходять на поверхню деталей, не відбулося (рис. 6). Це узгоджується з механізмом баротермічного впливу, при якому усунення, а також зменшення мікропористості може бути досягнуто тільки у внутрішніх об'ємах металу [10–12].

Механічні та жароміцні властивості визначали на пальчикових зразках ($\varnothing$ і $\square$ 12 мм), відлитих методом рівноосної кристалізації зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсними частинками карбонітриду титану [Ti(C,N)], після ГІП і термічної обробки за стандартним режимом.

Результати механічних випробувань та випробувань на тривалу міцність наведено у таблиці 3.

З даних, представлених у таблиці 4, видно, що механічні та жароміцні властивості, перевірені на зразках, відлитих з модифікованого частинками карбонітриду титану сплаву ЖСЗДК-ВІ (як до, так і після ГІП), задовільні та відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85.

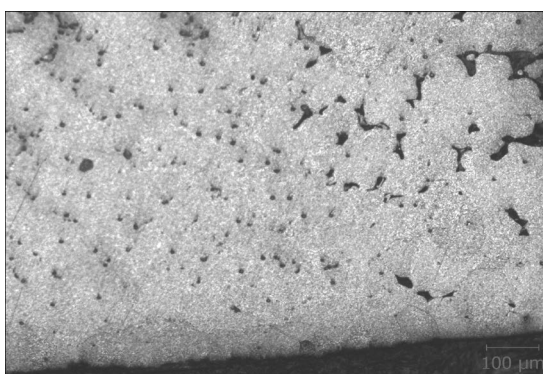


Рис. 6. Усадкова рихлота, що виходить на поверхню пера лопатки зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, після ГІП та стандартної термообробки

Таблиця 2
Параметри структурних складових у робочих лопатках із сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого [Ti+Ti(C,N)] (ГІП + стандартна термообробка)

Зона дослідження	Розміри структурних складових, мкм		
	карбіди		мікропори
	глобулярні типу МС	пластинчасті типу M_6C	
Перо	1,5...12	8...22	одиничні ~9
Хвостовик	2...16	8...35	одиничні ~6

Таблиця 3

**Механічні та жароміцні властивості робочих лопаток зі сплаву
ЖСЗДК-ВІ, модифікованого [Ti+Ti(C,N)] (ГІП + стандартна
термообробка)**

Стан матеріалу	Механічні властивості при 20 °С				Час до руйнування при 850 °С під навантаженням 350 МПа, τ_p , год.
	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, кгс-м/см ²	
без ГІП	1032	11,6	9,1	4,50	193,3
	1001	12,0	12,4	4,38	187,5
	1081	13,2	10,1	5,38	
після ГІП	1102	11,7	10,9	9,13	366,5
	950	7,0	7,0	5,38	279,5
Норми ОСТ 1 90126-85	≥ 950	≥ 7,0	–	≥ 3,0	≥ 50,0

Мікроструктура пальчикових зразків $\varnothing$ і $\square$ 12мм після проведення операції ГІП та термообробки за стандартним режимом, аналогічна структурі лопаток, оброблених відповідно до зазначеного режиму.

Висновки

Робочі лопатки турбіни вентилятора відлиті зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсними частинками карбонітриду титану [Ti(C,N)], після гарячого ізостатичного пресування (ГІП) за хімічним складом, структурою, механічними і жароміцними властивостями відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85.

В процесі технологічної операції гарячого ізостатичного пресування відбувається «заліковування» пір і рихлот. У структурі досліджених лопаток після ГІП мікропори та рихлоти практично відсутні.

Встановлено, що значення величини кута загину на досліджених лопатках перебувають на рівні 98...107°. Тріщин немає.

Механічні та жароміцні властивості, перевірені на зразках, відлитих із модифікованого частинками карбонітриду титану сплаву ЖСЗДК-ВІ (як до, так і після ГІП), задовільні та відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85.

У структурі лопаток (як у пері, так і в хвостовику) виявлено скупчення карбонітридних частинок розміром до 16 мкм.

Таким чином застосування технологічної операції гарячого ізостатичного пресування до лопаток, виготовлених методом рівноосного лиття з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого ультрадисперсними частинками Ti(C,N), дозволяє мінімізувати наявність дефектів ливарного походження і таким чином забезпечити необхідний рівень комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей готових виробів.

Список літератури

- 1 Симс, Ч. Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: В 2-х кн. / Под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля; Пер. с англ. под ред. Р.Е. Шалина. М.: Металлургия, 1995. Кн. 1. 384 с.; Кн. 2. 384 с.
- 2 D.V.V. Satyanarayana, N.E. Prasad. Nickel-based superalloys. Aerospace Materials and Material. Volume 1: Aerospace Materials, 2017. Pp. 199–228.
- 3 Erickson, G. L. The Development of the CMSX-11B and CMSX-11C Alloys for Industrial Gas Turbine Application. Superalloys. 1996. P. 45–52.
- 4 Michels, H. T., Friend W.Z. Nickel-Base Superalloys. Corrosion of Nickel and Nickel-Base Alloys. New York, 1980. P. 435–449.

- 5 Ажажа В.М., Свердлов В.Я., Кондратов А.А. и др. Влияние условий кристаллизации на макроскопический фронт кристаллизации и структурное совершенство монокристаллов Ni-сплавов. *Вестник ХНУ*. 2007. № 781. Вып. 3 (35). С. 73–80.
- 6 Tsivirko, É. I., Zhemanyuk, P. D., Klochikhin, V. V., Naumik, V. V., Lunev, V. V. Crystallization processes, structure and properties of castings from high-temperature nickel alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001. № 43 (9–10). P. 382–386.
- 7 Галдин Н. М., Чернега Д. Ф., Иванчук Д. Ф. и др. Цветное литьё: справочник /под общ. ред. Н. М. Галдина. М.: Машиностроение, 1989. 528 с.
- 8 Ажажа В.М., Горбенко Ю.В., Ковтун Г.П. и др. Рост монокристаллов сплава Ni-W в условиях высокого градиента температуры. *Кристаллография*. 2004, том 49, № 2. С. 382–386.
- 9 Kuznetsov, V. P., Lesnikov, V. P., Konakova, I. P., Popov, N. A., Kvasnitskaya, Y. G. Structural and Phase Transformations in Single-Crystal Rhenium- and Ruthenium-Alloyed Nickel Alloy Under Testing For Long-Term Strength. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, 57 (7–8), стр. 503–506.
- 10 Падалко, А. Г. Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов: монография [Текст]. М.: ИЦК Академкнига, 2007. С. 194–230
- 11 Klochihin V., Lysenko N. and Naumyk V. Structure and properties of heat-resistant nickel alloys castings after hot isostatic pressing / Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2017, MS and T 2017. Volume 2 (2017). С. 1370–1374.
- 12 Жеманюк П. Д., Клочихин В. В., Лысенко Н. И., Наумик В. В. Комплексное влияние технологических операций на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 3/12 (63). С. 68–73.
- 13 Сабуров, В. П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов. *Литейное производство*. 1988. № 9. С. 7–8.
- 14 Богуслаев А. В., Клочихин В. В., Лысенко Н. А. и др. Использование нанотехнологий в литейном производстве. *Вестник ДГМА*. 2011. № 4 (25). С. 23–28.

Надійшла 24.08.2022

References

- 1 Sims, Ch. T. (1995). Superalloys II: Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants: In 2 books. / Ed. Ch.T. Sims, N.S. Stoloff, W.K. Hagel; Translated from English, ed. R. E. Shalina. М.: Metallurgy, 1995. Book. 1. 384 p.; Book. 2. 384 p. [in Russian].
- 2 D. V. V. Satyanarayana, N. E. Prasad. (2017). Nickel-based superalloys. Aerospace Materials and Material. Volume 1: Aerospace Materials. Pp. 199–228.
- 3 Erickson, G. L. (1996). The Development of the CMSX-11B and CMSX-11C Alloys for Industrial Gas Turbine Application. Superalloys. P. 45–52.
- 4 Michels, H. T., Friend W. Z. (1980). Nickel-Base Superalloys. Corrosion of Nickel and Nickel-Base Alloys. New York. P. 435–449.
- 5 Azhazha V. M., Sverdlov V. Ya., Kondratov A. A. (2007). Influence of crystallization conditions on the macroscopic crystallization front and structural perfection of single crystals of Ni-alloys. *Vestnik of KhNU*. No. 781. Issue. 3 (35). pp. 73–80. [in Russian].
- 6 Tsivirko, É. I., Zhemanyuk, P. D., Klochikhin, V. V., Naumik, V. V., Lunev, V. V. (2001). Crystallization processes, structure and properties of castings from high-temperature nickel alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. № 43 (9–10). P. 382–386.
- 7 Galdin N. M., Chernega D. F., Ivanchuk D. F. et al. (1989). Non-ferrous casting: reference book / ed. ed. N. M. Galdina. М.: Mashinostroenie, 1989. 528 p. [in Russian].
- 8 Azhazha V. M., Gorbenko Yu. V., Kovtun G. P. (2004). Growth of monocrystals of Ni-W alloy under conditions of high temperature gradient. Crystallography. Volume 49, No. 2, pp. 382–386. [in Russian].

- 9 Kuznetsov, V. P., Lesnikov, V. P., Konakova, I. P., Popov, N. A., Kvasnitskaya, Y. G. Structural and Phase Transformations in Single-Crystal Rhenium- and Ruthenium-Alloyed Nickel Alloy Under Testing For Long-Term Strength. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, 57 (7–8), стр. 503–506.
- 10 Padalko, A. G. The practice of hot isostatic pressing of inorganic materials: monograph [Text]. M.: ICK Akademkniga, 2007. S. 194–230. [in Russian].
- 11 Klochihin V., Lysenko N. and Naumyk V. (2017). Structure and properties of heat-resistant nickel alloys castings after hot isostatic pressing / Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2017, MS and T 2017. Volume 2 (2017). C. 1370–1374.
- 12 Zhemanyuk P. D., Klochikhin V. V., Lysenko N. I., Naumik V. V. (2013). Complex effect of technological operations on the structure and properties of heat-resistant nickel alloy ZhS3DK-VI. *East European Journal of Advanced Technologies*. No. 3/12 (63). pp. 68–73. [in Russian].
- 13 Saburov V. P. (1988). Strengthening modification of steel and alloys. Foundry. No. 9. S. 7–8. [in Russian].
- 14 Boguslaev A. V., Klochikhin V. V., Lysenko N. A. et al. (2011). Use of nanotechnologies in foundry production. *Vestnik of the DSMA*. No. 4 (25). pp. 23–28. [in Russian].

Received 24.08.2022

V. V. Klochikhin, PhD (Engin.), головн. металург;

e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

O. O Pedash, PhD (Engin.); e-mail: tb.ugmet@motorsich.com

S. M. Danilov*, Postgraduate, the Director; e-mail: m_zmzmotor@ukr.net

D. O. Tomkin*, e-mail: tajdv678@gmail.com

O. O Naumyk**, e-mail: enaumyk@gmail.com

V. V. Naumyk**, Dr. Sci. (Engin.); Professor; Vice-Rector;

e-mail: vnaumyk@gmail.com; naumik@zp.edu.ua;

*JSC «Motor Sich» (Zaporizhia, Ukraine)

**Zaporizhzhya Polytechnic National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

CORRECTION OF CASTING DEFECTS IN BLADES FROM ZhS3DK-VI ALLOY MODIFIED WITH ULTRAFINE PARTICLES OF TITANIUM CARBONITRIDE BY HOT ISOSTATIC PRESSING

Research has established that the application of the technological operation of hot isostatic pressing (HIP) to blades made by the equiaxial casting method from heat-resistant nickel alloy ZhS3DK-VI modified with ultradisperse Ti(C, N) particles allows for minimizing the presence of defects of foundry origin and thus ensure the required level of complexity physicomechanical and operational properties of finished products. The investigated working blades of the fan turbine (both before and after GIP) meet the requirements of OST 1 90126-85 in terms of chemical composition, structure, and mechanical and heat-resistant properties. The values of the angle of bending on the studied blades are within 98...107°. There are no cracks. During the operation of hot isostatic pressing, "healing" of pores and cracks occurs. In the structure of the examined blades after the GIP, micropores, and rickholes are practically absent. The size of the macro grain in the feather of the studied blade is ~0.75...2.0 mm, which is ~2 times smaller than in the tail part. An accumulation of carbonitride particles up to 16 µm in size was found in the structure of the blades (both in the feather and in the shank). The distance between the axes of the second-order dendrites in the feather of the blades is approximately ~1.5 times smaller than in the tail part.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, working blade, ultrafine particles, titanium carbonitride, hot isostatic pressing, chemical composition, structure, mechanical properties, heat resistance.