

Slags, Fluxes and Salts MOLTEN 2024 Proceedings. – Brisbane, AusIMM, 2024. – ID: P-04120-D5P7M3.

9. Рециклінг відпрацьованого некомпактного інструменту зі швидкоріжучої сталі способом електрошлакового переплаву / Є.О. Педченко, Ю.В. Костецький, Л. Петренко, Л.Б. Медовар // Сучасна електрометалургія. – 2022. – №3. – С.23-28. doi: 10.37434/sem2022.03.04

10. Electroslag remelting of variable cross-section electrodes using a two-circuit scheme / Ye. O. Pedchenko, V. L. Petrenko, Yu. V. Kostetskyi, G. O. Polishko, V. A. Zaitsev // Proceedings of the VIIth International Conference on Welding and Related Technologies WRT 2024, Yaremche. – CRC Press, 2025. – P. 25-28. doi: 10.1201/9781003518518-5

Кудін В. В.¹, Єфременко В. Г.², Бойчук Р. В.¹, Шалдін О. М.¹

Голтвяниця В. С.¹, Матвейшин М. В.¹, Кармазін М. О.¹

(¹НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя;

²Словацька академія наук, м. Кошице)

**ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛОПАТОК
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ІЗ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ**

E-mail: kudin@zp.edu.ua

Розвиток авіаційного газотурбобудування направлений на зростання робочих параметрів газотурбінних двигунів (ГТД) [1], яке супроводжується збільшенням рівня температур, питомої потужності, економічності та навантаженості деталей турбіни з одночасним підвищенням вимог до надійності та ресурсу роботи ГТД [2]. Надійність і тривалість роботи ГТД залежать від експлуатаційної довговічності деталей гарячого тракту турбіни: лопатки та соплові апарати. Основними сплавами для виготовлення цих деталей є високолеговані жароміцні сплави на нікелевій основі [3].

В сучасних авіаційних двигунах з тривалим ресурсом роботи (більше 10000 годин) використовуються лопатки з жароміцних нікелевих сплавів. Лопатки в процесі експлуатації зазнають впливу високих температур 760-975 °С, статичних та динамічних напружень до 250 МПа. В складних умовах реальна експлуатаційна

довговічність лопаток з вказаних сплавів не перевищує 1500-2000 годин, потім вони знімаються з експлуатації [4]. Це призводить до багаторазової заміни комплектів лопаток та збільшення витрат на капітальні ремонти ГТД.

Експлуатаційна довговічність лопаток залежить від стабільності структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Поліпшення цих показників можливо шляхом вдосконалення технології виробництва лопаток додаванням раціональної кількості модифікаторів, розробкою технології їх введення та поліпшенням режиму термічної обробки. Досвід попередніх досліджень показує доцільність використання модифікаторів гафнію [5, 6, 7] та цирконію [8, 9].

В даній роботі досліджували вплив модифікування нікелевих сплавів гафнієм і цирконієм на структуру і властивості лопаток ГТД, розробляли технологію введення модифікаторів та вдосконалювали режим термічної обробки модифікованих сплавів. Використовували нікелеві сплави у вигляді литих заготовок, які мали хімічний склад (табл. 1). Сплави виплавляли у вакуумній індукційній установці УППФ-3М з основним тиглем місткістю 15 кг. Для модифікування розплавів використовували гафній-нікелеву (HfNi-10) та цирконій-нікелеву (ZrNi-85) лігатури, які дробилися до розмірів 0,2-1,0 мм. В сплав № 1 вводили 0,01-0,08 % цирконію, в сплав № 2 0,1-1,0 % гафнію та 0,02-0,09 % цирконію.

Таблиця 1 – Хімічний склад жароміцних сплавів на нікелевій основі

Вміст, %	C	Ni	Cr	W	Co	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	Si	Mn
Сплав № 1	0,13- 0,20	54,3- 62,7	8,0- 9,5	9,5- 11,0	9,0- 10,5	5,1- 6,0	2,0- 2,9	1,2- 2,4	0,8- 1,2	до 1,0	до 0,4	до 0,4
Сплав № 2	0,06- 0,11	57,5- 65,3	11,0- 12,5	3,8- 4,5	8,0- 10,0	4,0- 4,8	2,5- 3,2	3,8- 4,5	—	до 2,0	до 0,4	до 0,4

Плавки сплавів проводили при вакуумі 0,66-1,33 Па, нагрівали до температури 1600 °С і витримували 2 хвилини, при температурі 1580 ± 10 °С додавали

модифікатори і витримували 10-30 секунд. При температурі 1570 ± 10 °C модифіковані розплави заливали в нагріті до 950 °C електрокорундові керамічні форми, виготовлені за витоплювальними моделями. Виливки піддавали термічній обробці: нагрів до $1210 + 15$ °C, витримка 4 години, охолодження на повітрі. Механічні властивості визначали згідно DIN EN ISO 6892-1 при температурі 20 °C на розривній машині WDW-600E. Довготривалу міцність визначали згідно DIN EN ISO 6892-2 при температурах 750 °C, 850 °C, 975 °C на машині KAPPA DS. Мікроструктуру сплавів досліджували на оптичному мікроскопі NEOPHOT 32, електронному мікроскопі JEOL JSM-IT810 та електронно-зондовому мікроаналізаторі JEOL JXA-8230 [10].

Технологія введення модифікаторів фракцією 0,2-1,0 мм показала, що витримка рідкого розплаву впродовж 10-30 секунд забезпечувала рівномірний розподіл елементів по всьому об'єму металу та максимальне засвоєння 94-98 %. Витримка менше 10 секунд недостатня для рівномірного розподілу по об'єму металу та повного розчинення. При витримці більше 30 секунд зменшувався відсоток засвоєння та втрачалася модифікуюча дія.

Металографічний аналіз макроструктури лопаток показав, що введення гафнію та цирконію в нікелеві сплави сприяло зменшенню середнього розміру макрозерна (рис. 1), кількості та розмірів крихкої складової у вигляді фасеток внутрішньо зеренного сколу.

Модифікування лопаток гафнієм та цирконієм зменшувало розміри дендритних осередків та відстані між осями дендритів, дробленню гілок карбідів типу «китайських ієрогліфів» та їх глобуляризації. Збільшення вмісту гафнію та цирконію призводило до глобуляризації більшості карбідів (рис. 2).

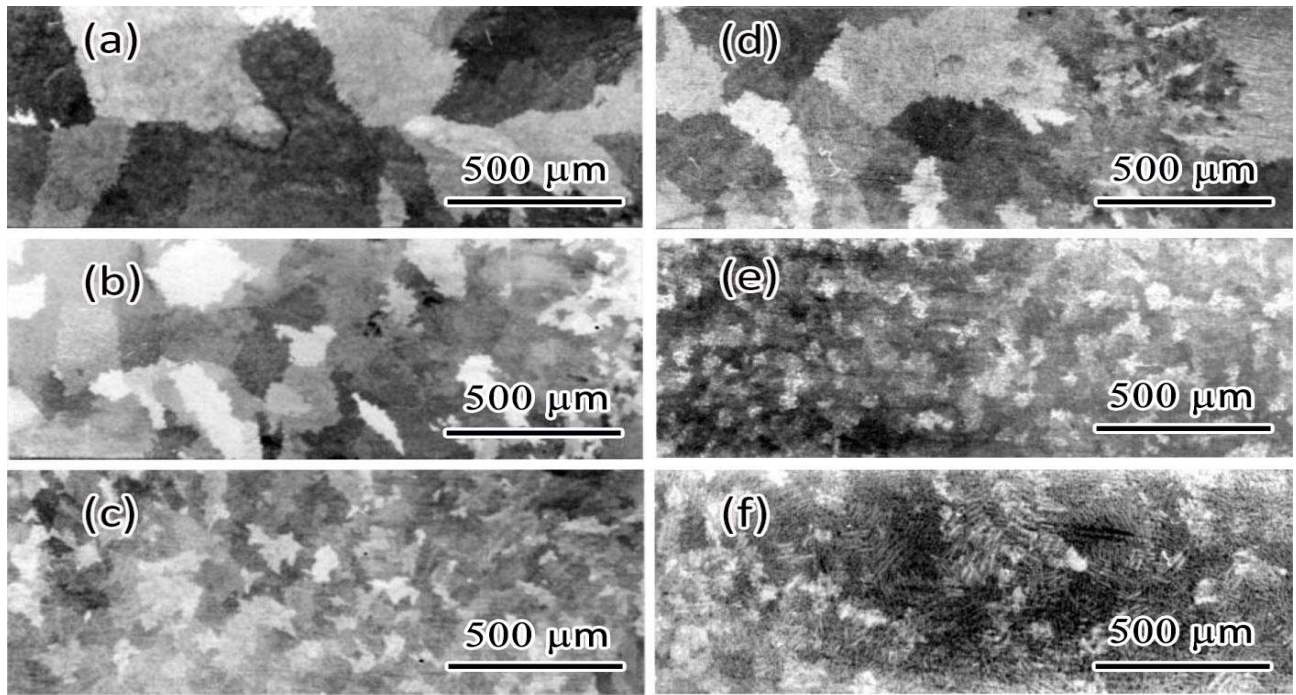


Рис. 1. Макроструктура нікелевого сплаву № 1, модифікованого гафнієм та цирконієм: (а) без модифікаторів, (б) 0,445 % Hf, (с) 1,267 % Hf, (д) 0,048 % Zr, (е) 0,224 % Zr, (ф) 0,387 % Zr

Рентгеноспектральний мікроаналіз сплавів модифікованих гафнієм показав, що карбіди округлої форми містять (Hf, Ti, Nb, W) C (рис. 3, а). Утворення глобулярних карбідів обумовлено високими карбідоутворюючими властивостями гафнію, що перевищує карбідоутворення Ti, Nb, W. Введення гафнію розширювало інтервал кристалізації, що сприяло глобуляризації та збільшенню розмірів карбідів (рис. 4, с). Карбіди (Hf, Ti, Nb, W) C оточені зміцнюючою γ' -фазою є ефективними зміцнювачами міжзеренних кордонів.

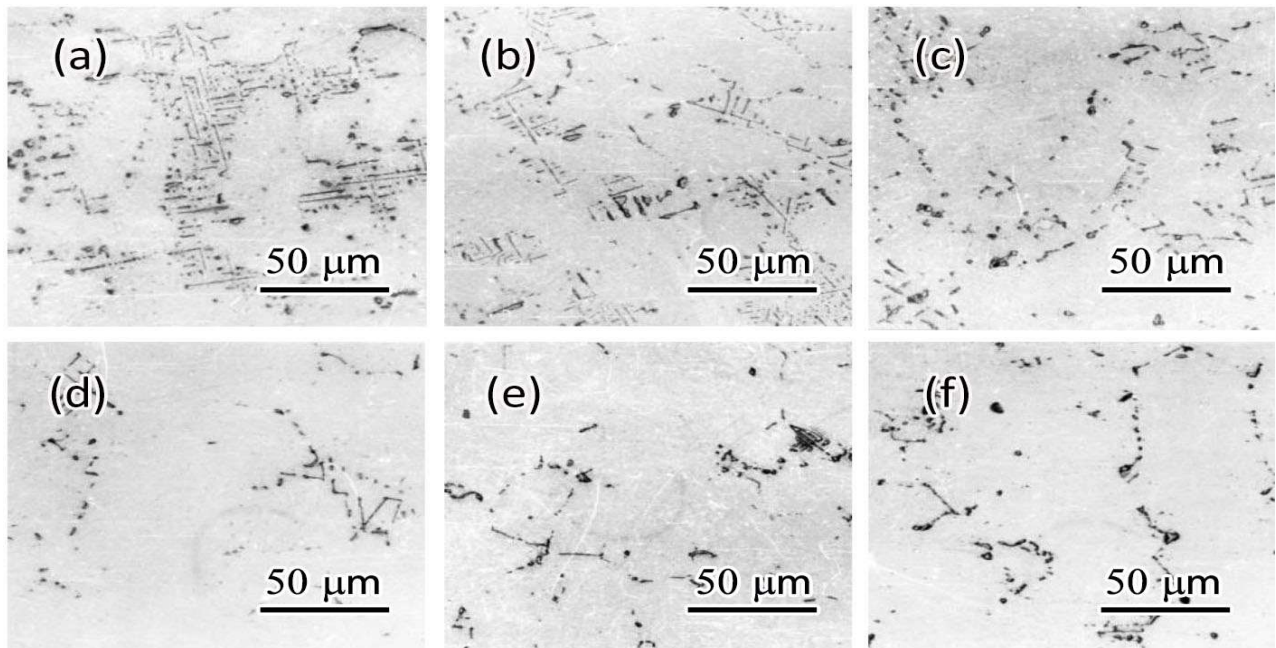


Рис. 2. Мікроструктура та карбіди в сплавах № 1 (a, b, c) та № 2 (d, e, f), модифікованих гафнієм та цирконієм: (a, d) без модифікаторів, (b) 0,445 % Hf, (c) 0,387 % Zr, (e) 0,681 % Hf, (f) 0,362 % Zr

В сплаві № 1 модифікованим гафнієм, спостерігалися карбіди кубічної форми, що мали змінний хімічний склад. Центральні ділянки збагачені гафнієм та титаном, крайні ніобієм та вольфрамом (рис. 3, b). При кристалізації на зародку карбіду (Hf, Ti) C росте карбід (Nb, W) C, що обумовлено термодинамічними властивостями утворення карбідів. Дослідження карбідів нікелевих сплавів № 1 та № 2 модифікованих гафнієм показало, що середній розмір карбідів збільшувався при підвищенні вмісту гафнію. Кількість карбідів збільшилась в 1,6 рази, середній розмір в 1,5 рази (рис. 4, c).

При вмісті в нікелевих сплавах цирконію спостерігалися карбіди хрестоподібної форми (рис. 3, c). Рентгеноспектральний мікроаналіз показав, що карбіди такої форми містять (Zr, Nb, W, Ti) C. Кількісним аналізом встановлено, що збільшення вмісту цирконію підвищило середній розмір карбідів в сплаві № 1 з 4,7 мкм до 6,5 мкм, в сплаві № 2 з 5,2 мкм до 7,1 мкм (рис. 4, c). Гафній та цирконій, входячи до складу карбідних фаз, сприятливо змінювали морфологію, збільшували кількість та середній розмір карбідів.

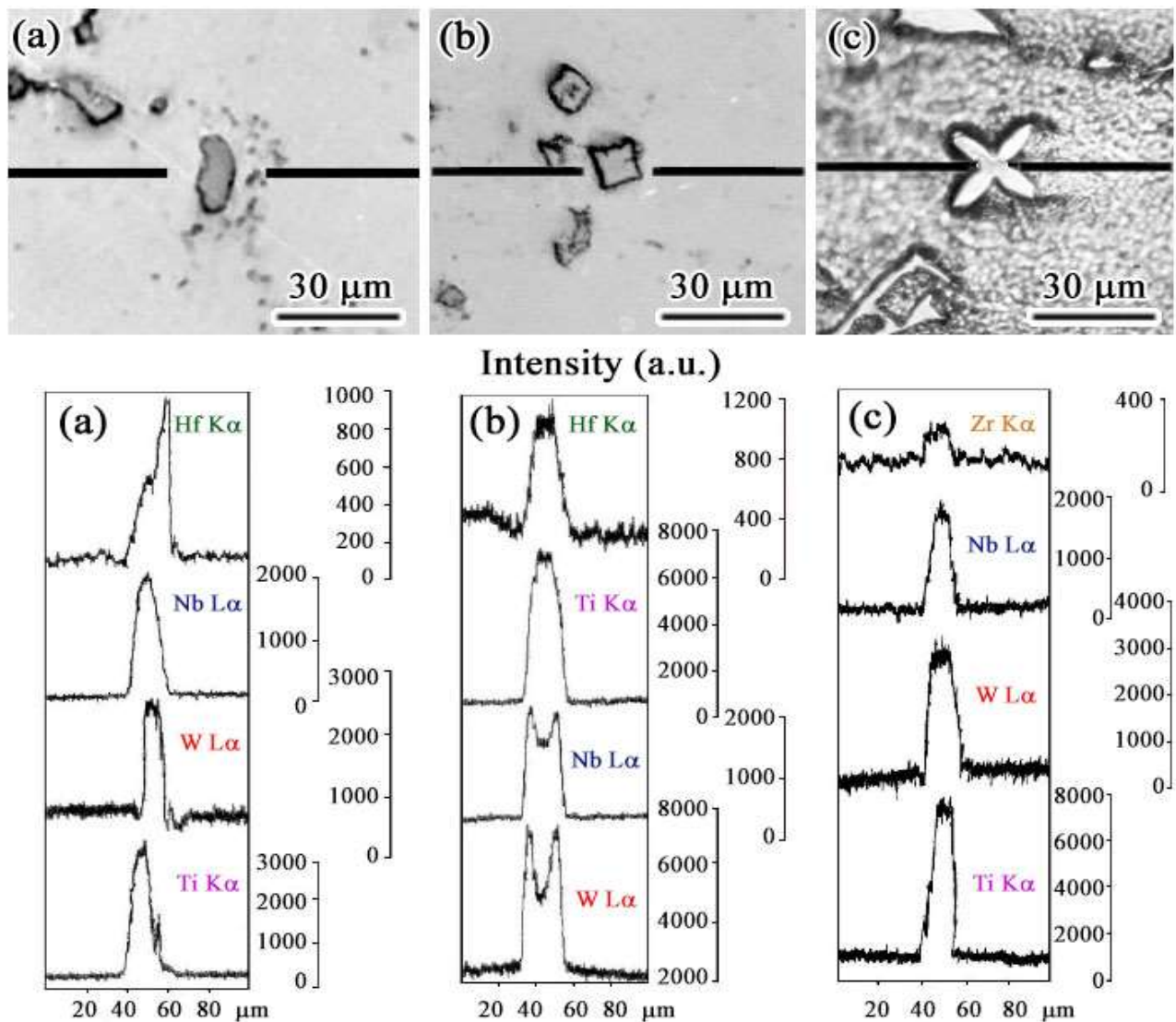


Рис. 3. Рентгеноспектральний мікроаналіз карбідів сплавів модифікованих гафнієм та цирконієм: (а) глобулярні, (б) кубічні, (с) хрестоподібні

В мікроструктурі сплавів № 1 та № 2 виділялася евтектична ($\gamma+\gamma'$)-фаза у міжвісних просторах та на межах зерен у вигляді цілісних конгломератів «пелюсток» ($\gamma+\gamma'$)-фази і прожилок γ -фази (рис. 5). Модифікування сплавів гафнієм та цирконієм призводило до зміни її морфології, кількості та розмірів. Кількісна оцінка евтектичної ($\gamma+\gamma'$)-фази показала, що середній розмір фази збільшувався з підвищенням вмісту гафнію. В сплавах № 1 та № 2 модифікованими гафнієм кількість збільшилася в 2 рази, середній розмір 1,6 рази. Модифікування сплавів цирконієм збільшувало вміст, але зменшувало середній розмір ($\gamma+\gamma'$)-фази з 20 до 16 мкм (рис. 4, b).

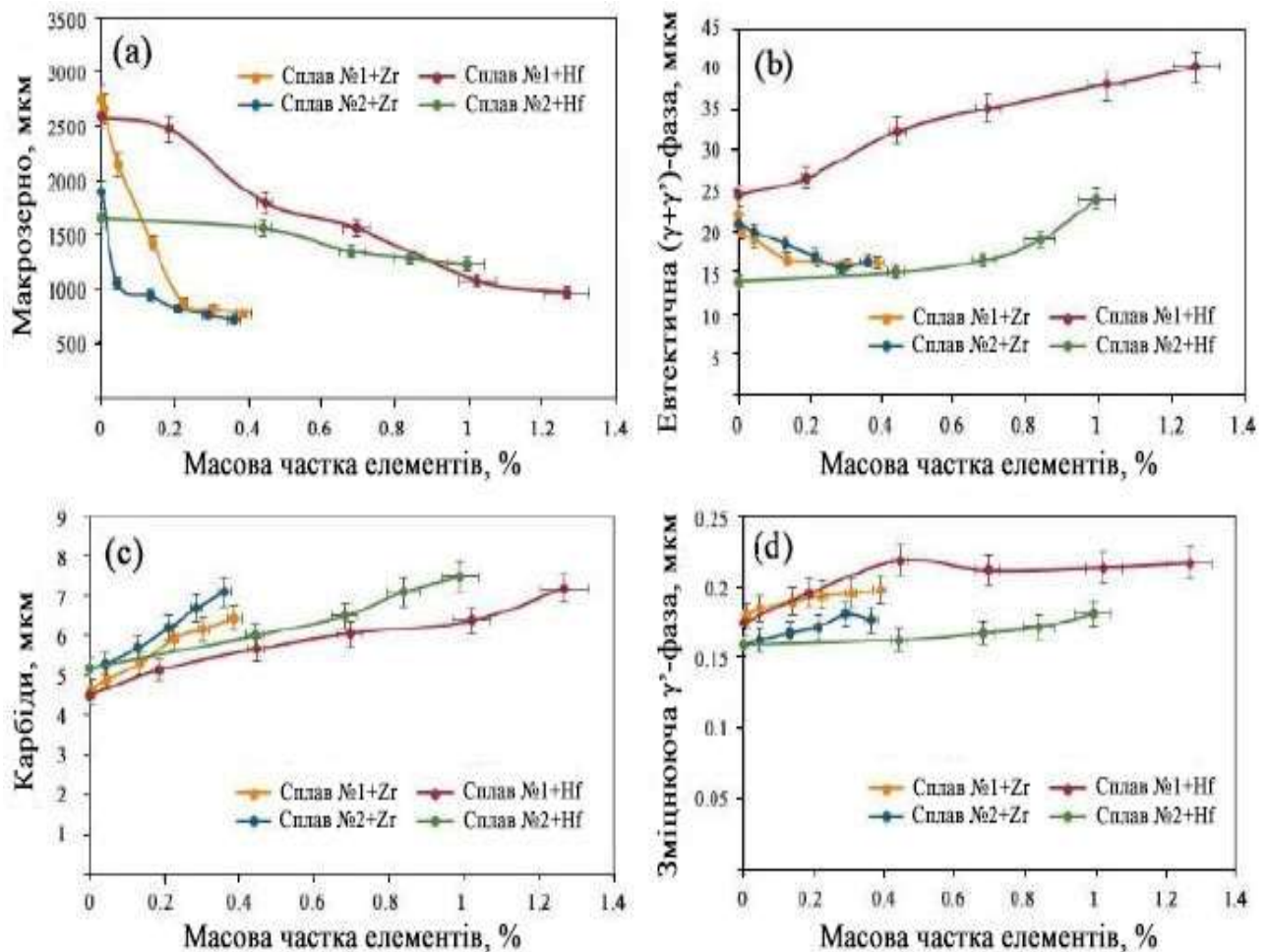


Рис. 4. Розміри складових сплавів модифікованих гафнієм та цирконієм: (а) макрозерно, (б) евтектична (γ+γ')-фаза, (с) карбіди, (d) зміцнююча γ'-фаза

Розробили вдосконалену технологію виробництва лопаток з жароміцного нікелевого сплаву № 1, якою передбачено модифікування цирконієм та використанням раціонального режиму термічної обробки. Цирконій вводили в рідкий метал від 0,01 до 0,08 %. Випробування механічних властивостей лопаток із сплаву № 1 показали, що виливки модифіковані 0,03-0,05 % цирконію мали максимальні значення міцності, подовження, ударної в'язкості при 20 °С та тривалої міцності при температурах 760 °С та 975 °С (табл. 2).

При модифікуванні цирконієм в кількості 0,01 % та 0,02 % відбувалось незначне підвищення механічних і жароміцних властивостей. Введення 0,06 % цирконію і більше, підвищувало фізико-механічні властивості виливків в

порівнянні з немодифікованим металом, однак їх значення були нижчі, ніж при модифікуванні 0,03-0,05 % цирконію (табл. 2).

Таблиця 2 – Властивості лопаток сплаву № 1 модифікованого цирконієм

Масова частка цирконію, %	Механічні властивості при 20 °С			Тривала міцність, МПа	
	σ_b , МПа	δ , %	KCU, кДж/м ²	σ_{1000}^{760}	σ_{100}^{975}
Немає	972	4,0	290,2	153	184
0,01	968	4,4	290,5	160	188
0,02	975	4,7	300,2	203	190
0,03	1003	5,2	300,8	290	258
0,04	1010	5,4	311,6	350	227
0,05	996	6,0	310,5	267	198
0,06	980	5,0	310,2	258	169
0,08	984	5,2	310,4	271	135

Зміни фізико-механічних властивостей та мікроструктури лопаток оцінювали не тільки в залежності від вмісту цирконію, також від різних режимів термічної обробки. З метою надання максимальних механічних і жароміцних властивостей лопаткам із нікелевого сплаву № 1 модифікованого цирконієм в кількості 0,03-0,05 % їх піддавали декільком режимам термічної обробки. Результати випробувань показали, що найбільший вплив на підвищення властивостей лопаток, мав наступний режим термічної обробки: нагрів до $1230 \pm 5^\circ\text{C}$, витримка 4 години, охолодження на повітрі (табл. 3).

В мікроструктурі сплавів виділялася евтектична ($\gamma+\gamma'$)-фаза у міжвісних просторах та на межах зерен у вигляді цілісних конгломератів «пелюсток» ($\gamma+\gamma'$)-фази і прожилок γ -фази (рис. 5). Модифікування сплавів гафнієм та цирконієм призводило до зміни її морфології, кількості та розмірів. Кількісна оцінка евтектичної ($\gamma+\gamma'$)-фази показала, що розмір фази збільшувався з підвищенням вмісту гафнію. В сплавах № 1 та № 2 модифікованими гафнієм кількість збільшилася в 2 рази, середній розмір 1,6 рази. Модифікування сплавів

цирконієм збільшувало вміст, але зменшувало середній розмір ($\gamma+\gamma'$)-фази з 20 до 16 мкм (рис. 4, b).

Таблиця 3 – Властивості лопаток сплаву № 1 після термічної обробки

Режим термічної обробки	Механічні властивості при 20 °C			Тривала міцність, МПа	
	σ_B , МПа	δ , %	KCU, кДж/м ²	σ_{1000}^{760}	σ_{100}^{975}
Нагрів 1210 °C	1010	5,4	291,6	350	227
Нагрів 1220 °C	1012	5,5	292,4	378	260
Нагрів 1225 °C	1015	5,8	293,0	395	310
Нагрів 1230 °C	1026	6,0	296,3	417	334
Нагрів 1235 °C	1018	5,7	295,8	403	322
Нагрів 1240 °C	990	5,2	292,6	345	255

Металографічні дослідження мікроструктури лопаток показали, що термічна обробка по режиму: нагрів до $1230 \pm 5^\circ\text{C}$, витримка 4 години, охолодження на повітрі сприяла зменшенню кількості евтектичної ($\gamma+\gamma'$)-фази завдяки частковому розчиненню в γ -твердому розчині.

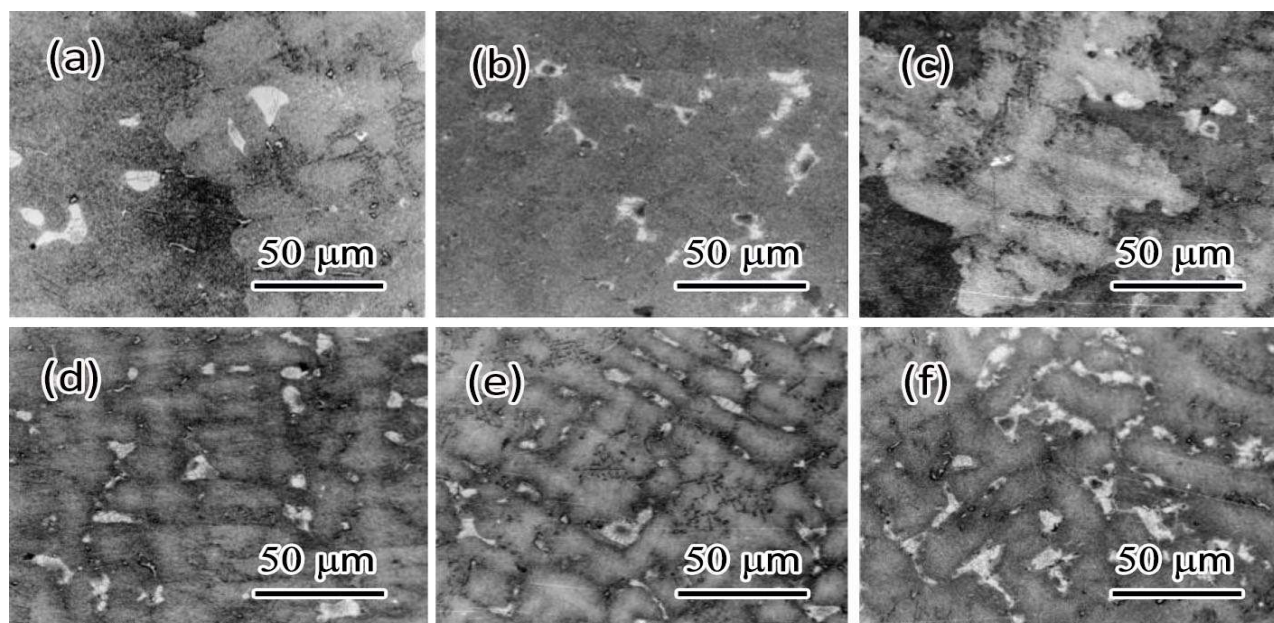


Рис. 5. Мікроструктура нікелевого сплаву № 1 модифікованого цирконієм: (a) без Zr, (b) 0,048 % Zr, (c) 0,138 % Zr, (d) 0,224 % Zr, (e) 0,307 % Zr, (f) 0,387 % Zr

Термічна обробка призводила до збільшення розмірів зміцнюючої γ' -фази в осях і міжосних просторах дендритів та вирівнюванню за хімічним складом в об'ємі металу (рис. 6). Термічна обробка лопаток з витримкою при температурі нижче 1225 °C недостатня для рівномірного вирівнювання розмірів γ' -фази. Підвищення температури вище 1235 °C призводило до появи «структур оплавлення», які зменшували фізико-механічні властивості лопаток. Кількісний аналіз зміцнюючої γ' -фази сплавів № 1 та № 2 показав, що модифікування гафнієм та цирконієм збільшувало її середній розмір (рис. 4, d).

Розробили вдосконалену технологію виробництва лопаток з жароміцного нікелевого сплаву № 2, який додатково містить гафній та цирконій. Механічні випробування показали, що стабільними і достатньо високими значеннями межі міцності, відносного подовження, ударної в'язкості при 20 °C і тривалої міцності при температурі 850 °C мали лопатки, які містять 0,4-0,7 % гафнію та 0,03-0,06 % цирконію (табл. 4).

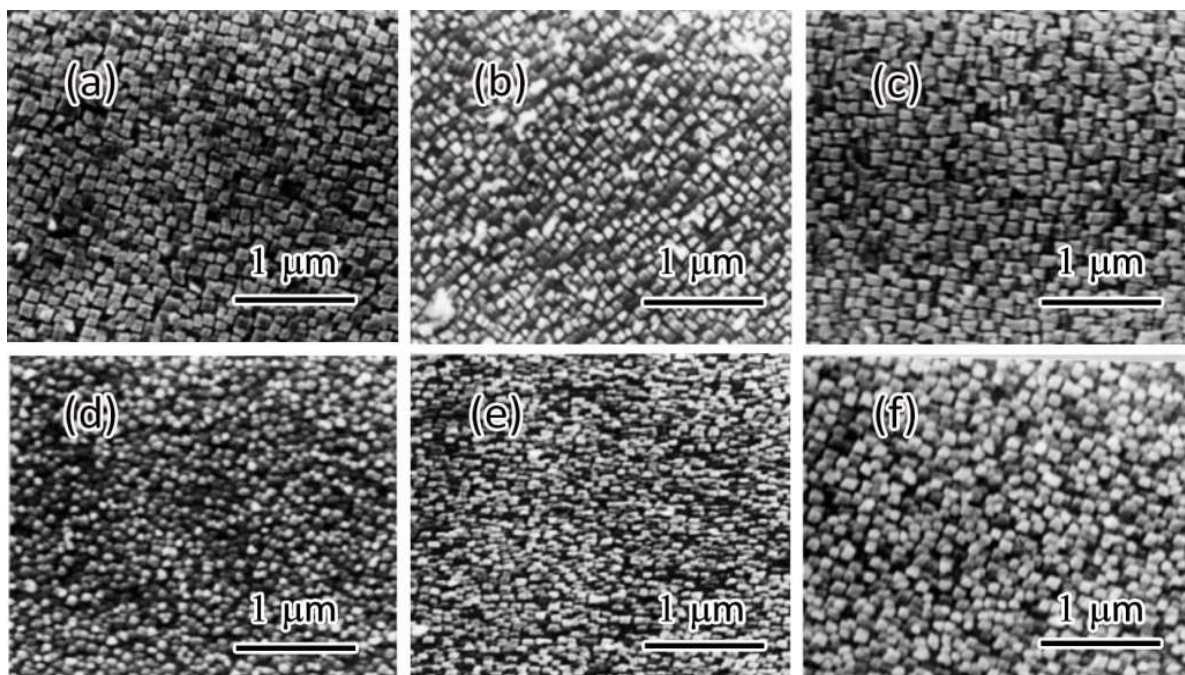


Рис. 6. Морфологія зміцнюючої γ' -фази сплавів № 1 (a, b, c) та № 2 (d, e, f), модифікованих гафнієм та цирконієм: (a, d) без модифікаторів, (b) 0,048 % Zr, (c) 0,445 % Hf, (e) 0,046 % Zr, (f) 0,839 % Hf

Розробили вдосконалену технологію виробництва лопаток з жароміцного нікелевого сплаву № 2, який додатково містить гафній та цирконій. Механічні випробування показали, що стабільними і достатньо високими значеннями межі міцності, відносного подовження, ударної в'язкості при 20 °С і тривалої міцності при температурі 850 °С мали лопатки, які містять 0,4-0,7 % гафнію та 0,03-0,06 % цирконію (табл. 4).

Таблиця 4 – Властивості лопаток сплаву № 2 з гафнієм та цирконієм

Масова частка елементів %		Механічні властивості при 20 °С			Тривала міцність, МПа
Hf	Zr	σ_B , МПа	δ , %	KCU, кДж/м ²	σ_{1000}^{850}
—	—	972	7,8	298,0	107
0,1	0,02	985	8,3	299,4	108
0,3	0,02	993	9,4	300,7	112
0,4	0,03	1012	10,8	303,5	116
0,5	0,04	1035	11,6	310,3	125
0,6	0,05	1056	12,0	308,2	138
0,7	0,06	1043	11,4	306,5	123
0,8	0,08	1028	10,8	296,4	115
1,0	0,09	1016	11,2	280,8	104

Металографічний аналіз показав, що вміст у лопатках 0,4-0,7 % гафнію і 0,03-0,06 % цирконію призводив до зменшення середнього розміру макрозерна (рис. 4, а), кількості та розмірів крихкої складової у вигляді фасеток внутрішньо зеренного сколу, дендритних осередків і відстані між вісями дендритів другого порядку, глобуляризації плівкових карбідів. Кількісна оцінка мікроструктури показала, що вміст гафнію 0,4-0,7 % та цирконію 0,03-0,06 % забезпечувало збільшення кількості структурних фаз: евтектичної ($\gamma+\gamma'$)-фази (рис. 4, b), карбідів (рис. 4, c) та зміцнюючої γ' -фази (рис. 4, d).

Розроблена технологія виробництва лопаток ГТД з жароміцного нікелевого сплаву № 1 модифікованого цирконієм та вдосконаленим режимом термічної

обробки підвищила межу міцності деталей на 5 %, відносно подовження в 1,5 рази, ударну в'язкість в 1,3 рази, тривалу міцність при 975 °С в 1,8 рази, при 760 °С в 2,7 рази. Розроблена технологія виробництва лопаток з жароміцного нікелевого сплаву № 2, що містить гафній та цирконій, підвищила межу міцності деталей на 7 %, відносно подовження на 50 %, ударну в'язкість на 100 % і тривалу міцність при 850 °С на 20 %. Розроблені технології модифікування жароміцних нікелевих сплавів гафнієм та цирконієм та вдосконаленим режимом термічної обробки дозволяють забезпечити більш високий рівень фізико-механічних властивостей лопаток, збільшити термін служби деталей гарячого тракту, що в цілому підвищить експлуатаційну довговічність роботи газотурбінних двигунів.

Література

1. Патон Б., Халатов А., Костенко Д., Білека Б., Письменний О., Боцула А., Парафійник В., Коняхін В. Концепція (проект) державної науково-технічної програми «Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики». Вісник НАН України. 2008. № 4. С. 3-9. ISSN 2518-1203. <https://doi.org/10.15407/visn>.
2. Гайдук С.В., Беліков С.Б. Наукові основи проектування ливарних жароміцних нікелевих сплавів з необхідним комплексом службових властивостей. Запоріжжя, ЗНТУ. 2017. 80 с. ISBN: 978-617-529-160-3.
3. Ключихін В.В, Наумик В.В. Удосконалення технологічних процесів одержання жароміцних нікелевих сплавів для турбінних лопаток з використанням ливарного повернення. Матеріалознавство та технології. 2019. С. 1454-1458. https://doi.org/10.7449/2019/MST_2019_1454_1458.
4. Mauro M. de Oliveira, Antônio A. Couto, Gisele F.C. Almeida, Danieli A.P. Reis, Nelson B. de Lima, Renato Baldan. Mechanical behavior of Inconel 625 at elevated temperatures. Metals, 2019. 9 (3), 301. <https://doi.org/10.3390/met9030301>.
5. Гайдук С.В., Кононов В.В. Дослідження гафнію на фазовий склад ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву із застосуванням

методу пасивного експерименту. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2014. № 1. С. 45-51. ISSN 1607-6885.

6. Лисенко Н.А., Кудін В.В., Ключихін В.Г., Цивірко Е.І. Жароміцні нікелеві сплави, модифіковані гафнієм та цирконієм. Металознавство та термічна обробка металів. 1999. Том 41 (12). С. 531-537. <https://doi.org/10.1007/BF02466546>.

7. Тихомирова Т.В., Гордієнко Е.І., Бехтер Р.В., Подобний О.В. Морфологія і топографія карбідної фази при легуванні сплаву ЖСЗДК-ВІ гафнієм і танталом. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2022. № 4 спецвипуск 2 (182). С. 108-113. <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.16>.

8. Цивірко Е.І., Лисенко Н.О., Ключихін В.Г., Жеманюк П.Д. Легування та модифікування нікелевих сплавів цирконієм. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2007. № 2. С. 22-29. ISSN 1607-6885.

9. Лисенко Н.А., Кудін В.В., Долгов Б.В., Цивірко Є.І. Модифікування ливарних жаростійких нікелевих сплавів цирконієм. Металознавство та термічна обробка металів, 1998. Том 40 (3). С. 103-106. <https://doi.org/10.1007/BF02467468>.

10. Notoya S. Development of a New Field Emission Electron Probe Microanalyzer JXA-8530 Plus. Jeol News, 2017. Vol. 52 № 1. P. 58-60. ISSN 1349-6832.

Кусков Ю. М.¹, Фесенко М. А.²

(¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона, Київ; ²ДУІКТ, Київ)

**ДОСВІД ОТРИМАННЯ КОМПОЗИТНОГО МЕТАЛУ З ВКЛЮЧЕННЯМИ
КАРБІДУ КРЕМНІЮ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЮ НАПЛАВКОЮ В
СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ**

E-mail: fesmak@ukr.net

Підвищену зносостійкість наплавленого металу за різних умов експлуатації можна забезпечити за допомогою формування у ньому композитної структури. Така структура відповідає принципу Шарпі: розташування твердих частинок відносно м'якої матриці. В якості таких структурних складових можуть стати хромистий чавун у вигляді матриці і карбід кремнію, як зміцнююча фаза.