

## СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

### STRUCTURE FORMATION. RESISTANCE TO DESTRUCTION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

УДК 669.245:669.145:621.746.5

- Сергій Данилов аспірант кафедри машин й технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: Dankar1378@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-8087-9638
- Олексій Педаш канд. техн. наук, керівник відділу АТ «Мотор Січ» м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: tb.ugmet@motorsich.com*, ORCID: 0000-0003-1231-9951
- Валерій Наумик д-р техн. наук, професор кафедри машин й технології ливарного виробництва, проректор з науково-педагогічної роботи та міжнародної діяльності Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: vnaumyk@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-0657-4510
- Дмитро Тьомкін аспірант кафедри машин й технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: tajdv678@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-4042-4452
- Олена Наумик аспірантка кафедри машин й технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: enaumyk@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-1963-1836

## КОМПЛЕКСНЕ МОДИФІКУВАННЯ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ ДИСПЕРСНИМИ ЧАСТКАМИ ТУГОТОПКИХ З'ЄДНАНЬ

**Мета роботи.** За рахунок комплексного модифікування жароміцного сплаву модифікаторами різного механізму дії забезпечити підвищення характеристик пластичності та ударної в'язкості до рівня, котрий дозволить локалізувати можливе руйнування крупногабаритних лопаток турбіни низького тиску авіаційного двигуна в процесі експлуатації.

**Методи дослідження.** Мікроструктурний аналіз та дослідження фазового складу проводили методами оптичної та сканувальної електронної металографії відповідно на оптичному та електронному мікроскопах.

**Отримані результати.** Проведено дослідження по комплексному модифікуванню сплаву ЖСЗДК-ВІ ітрієм та ультрадисперсними частинками карбонітриду титану  $Ti(C, N)$  перемінного вмісту (від 0,025 % до 0,075 %), при zalиванні розплаву у керамічну форму, перший робочий шар якої виконано із застосуванням алюмінату кобальту  $CoAl_2O_4$ . В структурі зразків дослідних варіантів, наряду із карбідами сферичної морфології, виявлено глобулярні карбіди, в місцях розташування котрих спостерігаються зони, що збагачені на ітрії, молібден та титан, та збіднені на хром. Результати дослідження дозволяють зробити припущення, що, ймовірно, високотемпературні первинні карбіди типу  $YC$ , слугують підложками для формування низькотемпературних модифікацій карбідів  $MC$ . В матеріалі, після введення у модифікований ітрієм розплав 0,050 % ультрадисперсних часток карбонітриду титану  $Ti(C, N)$ , забезпечено високі рівні ударної в'язкості ( $\sim 70$  Дж/см<sup>2</sup>) та часу до високотемпературного руйнування ( $> 500$  год).

**Наукова новизна.** Одержано нові дані щодо фазового стану сплаву ЖСЗДК-ВІ після комплексного модифікування за схемою  $(Ti(C, N)+Y+CoAl_2O_4)$ . Вивчено тонку будову жароміцного сплаву на основі нікелю, що традиційно використовується для отримання великогабаритних лопаток турбіни газотурбінного двигуна авіаційного призначення.

**Практична цінність.** Одержані результати розширюють можливості використання жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ для отримання виливків відповідального призначення.

**Ключові слова:** жароміцний сплав, структура, модифікування, карбонітрид титану, ітрії, алюмінат кобальту, термічна обробка.

#### Вступ

Жароміцні сплави, що застосовуються в газотурбобудуванні, окрім достатньої жароміцності й опору

втомному руйнуванню, повинні мати ще й достатній рівень пластичності, забезпечуючи високу працездатність деталей в умовах нерівномірного розподілення

напружень за перерізом. Зазвичай лопатки газотурбінних двигунів мають складну геометрію з наявністю зон з підвищеною концентрацією напружень, та працюють під дією відцентрових сил й динамічних навантажень від газового потоку, тому розподілення напружень за їх перерізом зазвичай має нерівномірний характер. Пластична деформація дозволяє розподілити напруження в матеріалі й суттєво їх знизити в об'ємах, рівень діючих напружень в котрих максимальний. У зв'язку з цим, до матеріалу лопаток (особливо великогабаритних) висувуються вимоги не тільки високих міцності й жароміцності, але й достатньої пластичності та ударної в'язкості, що в процесі експлуатації максимально унеможливають їх руйнування шляхом крихкого відриву під дією зовнішніх або внутрішніх чинників.

Раніше проведеними роботами [1–10] особлива увага приділялася вивченню й покращенню показників тривалої міцності й повзучості жароміцних сплавів, а також показників втоми при кімнатній і підвищених температурах. В той же час, питання забезпечення в конструкції лопаток достатнього рівня пластичності й ударної в'язкості розкрито недостатньо.

На сьогодні забезпечення підвищених характеристик деталей гарячого тракту та в цілому експлуатаційного ресурсу газотурбінних двигунів, як правило, здійснюють за двома основними напрямками: розробкою нових складнолегованих жароміцних сплавів з високим вмістом елементів, котрі володіють низькими коефіцієнтами дифузії в умовах високих температур та підвищення комплексу службових характеристик шляхом додаткового легування, модифікування та мікролегування промислових сплавів, що підтвердили свою надійність впродовж тривалої експлуатації в реальних умовах.

Оскільки впровадження нових матеріалів пов'язане із високими матеріальними затратами, то підвищення рівня експлуатаційної надійності деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів модифікуванням є більш продуктивним, завжди залишається перспективним та менш коштовним та зарегульованим.

Раніше проведені дослідження [11–16] показали, що рівень властивостей існуючих жароміцних сплавів може бути суттєво покращений за рахунок проведення спеціальних технологічних операцій, що виконуються при литті лопаток – модифікування, рафінування [17–23], а також обробкою відповідального жароміцного литва гарячим ізостатичним пресуванням [24–28], та впровадженням вдосконалених режимів термічної обробки. Саме комплексне застосування декількох зі згаданих (або інших) технологічних операцій, як правило, забезпечує якісно новий рівень експлуатаційних властивостей відповідальних литих деталей, виготовлених з відомих жароміцних сплавів, одночасно із високими техніко-економічними показниками.

Раніше проведеними дослідженнями [29–35] підтверджено позитивний вплив модифікування жароміцних сплавів ітрієм та дисперсними часткам карбонітриду титану для забезпечення стабільності структури, поліпшення властивостей та експлуатаційної

надійності відповідальних литих виробів для авіаційного та енергетичного машинобудування. Однак особливості експлуатації таких відповідальних деталей, як великогабаритні лопатки турбіни, вимагають від матеріалу як більш високого загального рівня механічних властивостей, так і стійкості до руйнування від ударного згину.

### Мета роботи

Метою даного дослідження є підвищення механічних властивостей жароміцного сплаву, перш за все, пластичності й ударної в'язкості на рівні, що унеможливить критичні ситуації в експлуатації (розліт уламків великогабаритних лопаток по складовим газотурбінного двигуна, спричинених їх випадковим обривом під дією зовнішніх або внутрішніх чинників), за рахунок комплексного модифікування модифікаторами різного механізму дії.

### Матеріал і методика досліджень

Досліджували зразки, а також фрагменти ливникової системи, відлиті з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, комплексно модифікованого ітрієм (0,01% (мас.)) та карбонітридом титану за наступними варіантами:

- 1 – присадка Ti(C,N) у розплав – 0,025 %;
- 2 – присадка Ti(C,N) у розплав – 0,050 %;
- 3 – присадка Ti(C,N) у розплав – 0,075 %.

На вакуумній плавильній установці, розплав усіх дослідних плавок заливали у керамічні форми, перший робочий шар котрих був виконаний з додаванням 5 % алюмінату кобальту.

Методом рівноосної кристалізації з комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів, отримували заготовки циліндричних зразків для механічних випробувань діаметром 12 мм, а також квадратного перерізу розміром 12 × 12 мм для випробувань на ударну в'язкість та визначення твердості. Надалі заготовки зразків піддавали гарячому ізостатичному пресуванню та стандартній термічній обробці – гомогенізації при температурі 1210±15 °С, з витримкою протягом 4 год і наступним охолодженням на повітрі.

Після обробки за вказаними варіантами, заготовки проходили механічну обробку для забезпечення розмірів, передбачених технічною документацією на виготовлення зразків для механічних випробувань.

Визначали хімічний склад матеріалу, а також макро- та мікроструктуру дослідних зразків. Макроструктуру виявляли методом хімічного травлення в реактиві з 80 % HCl та 20 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Механічні властивості при кімнатній температурі (границю міцності, границю текучості, відносне видовження, відносне звуження) визначали у відповідності до ISO 6892-84, СТ СЭВ 471-88. Випробування на розрив здійснювали на машині ZDMY30. Випробування на ударну в'язкість здійснювали на маятниковому копрі Instron SI-1M у відповідності до ДСТУ ISO 148-1:2022.

Випробування на тривалу міцність проводили відповідно до вимог ДСТУ ISO 204:2019 на установці моделі Instron M3 при температурі 850 °C і навантаженні 340 МПа до повного руйнування зразків.

### Результати досліджень та їх обговорення

Хімічний склад комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ всіх дослідних варіантів, за основними елементами, відповідає вимогам НТД на матеріал. Модифікуванням забезпечили наявність в сплаві ітрію у кількості 0,01 % (табл. 1).

**Таблиця 1** – Хімічний склад металу дослідних варіантів модифікування сплаву ЖСЗДК-ВІ

Варіант	Вміст елементів, мас. %						
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo
0,025% Ti(C,N)	0,07	11,6	8,7	3,8	4,6	2,8	3,8
0,050% Ti(C,N)	0,07	11,8	8,7	3,9	4,5	2,9	3,9
0,075% Ti(C,N)	0,08	11,8	8,8	3,9	4,6	2,8	3,8
Норми НТД	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

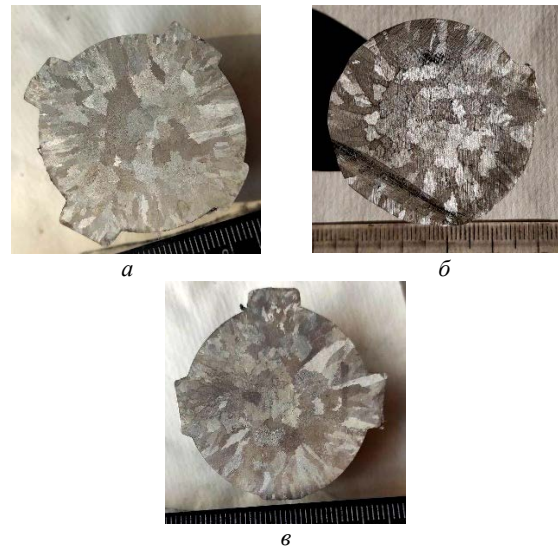
Примітка: вміст S, P, Mn ≤ 0,05; Ni – основа.

Дослідженням фрагментів, вирізаних з нижньої частини блоку зразків, виявлено наявність двох яскраво вироджених зон зі змінною морфологією макрозерна у виливках. Перша зона – зона стовбчастих кристалів, що розповсюджується від поверхні виливків до центральної частини, на відстань 6–10 мм (рис. 1). Ця зона, здебільшого, формується під впливом алюмінату кобальту [36–38], котрий був введений в перший робочий шар керамічної форми й володіє підвищеною теплопровідністю [39, 40] у порівнянні із нікелевим розплавом, тим самим забезпечуючи інтенсивне тепловідведення від нього. Друга зона – зона рівновісних зерен, що розташована переважно в центрі виливків й за діаметром становить 22–24 мм. Інтенсивне подрібнення зерна в цій зоні зумовлене дією дисперсних часток карбонітридів титану, що виступають додатковими центрами зародження кристалів, формуючи більш дрібнокристалічну структуру сплаву. Загалом простежується тенденція до зниження розмірів макрозерна при збільшенні об'ємного вмісту карбонітридів, що вводяться у розплав, й при введенні 0,075 % Ti(C, N) макрозерно подрібнювалося більш інтенсивно у порівнянні з іншими дослідними варіантами (табл. 2).

Результати виміру параметрів макроструктури фрагментів блоку зразків, відлитих із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ, наведено у таблиці 2.

При металографічному дослідженні встановлено, що мікроструктура зразків, відлитих зі сплаву ЖСЗДК-ВІ за усіма дослідними варіантами (після ГП та термічної обробки), являє собою  $\gamma'$ -твердий розчин, зміцнений інтерметалідною  $\gamma'$ -фазою, з наявністю карбідів і карбонітридів (рис. 2) та відповідає нормально термообробленому стану сплаву ЖСЗДК-ВІ й прийнятій шкалі мікроструктур.

Гарячим ізостатичним пресуванням при температурі 1210 °C і тиску 160 МПа вдалося позбутися усадкових мікропор та рихлот в дослідних зразках усіх варіантів. Відбулося залікування мікропор, що розташовувалися у внутрішніх об'ємах металу й не виходили на поверхню зразка. Практично повна відсутність внутрішньої мікропористості в ливарних жароміцних сплавах, в цілому, сприяє стабілізації їх структури і відповідно властивостей дослідного матеріалу.



**Рисунок 1.** Макроструктура у поперечному перерізі фрагментів блоку зразків із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів: а – 0,025 % Ti(C,N); б – 0,050 % Ti(C,N); в – 0,075 % Ti(C,N)

**Таблиця 2** – Параметри макроструктури (мм) фрагментів блоку зразків, відлитих із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ

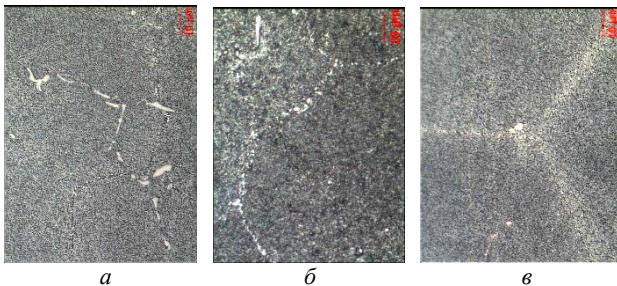
Варіант	Розмір кристалізаційних зон		Розмір макрозерна
	зона стовбчастих кристалів	зона рівновісних кристалів	
0,025% Ti(C,N)	7,5...10,5	16...22	1,5...5,0
0,050% Ti(C,N)	6,0...7,5	22...24	1,5...3,5
0,075% Ti(C,N)	6,5...10,0	17...24	1,0...3,5

Стандартними підрахунками структурних складових встановили, що середній розмір карбідних та карбонітридних включень становив 1,5–3 мкм (табл. 3).

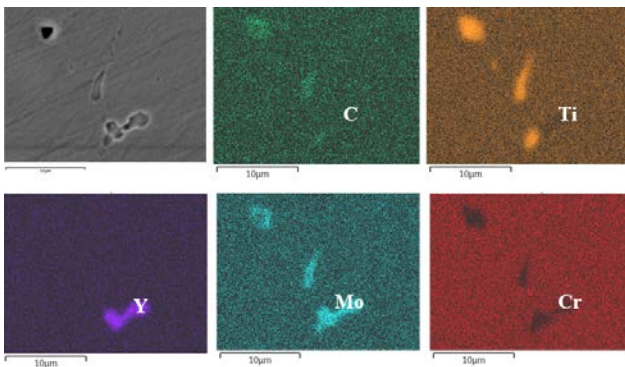
В структурі сплаву після комплексного модифікування, карбіди та карбонітриди виділяються у вигляді дрібних дискретних частинок переважно сферичної форми, що рівномірно розподілені в об'ємі матеріалу (рис. 2). Введення в розплав 0,025 % Ti (C, N) призвело до формування карбідів у вигляді пластин, що характерні для евтектичних карбідів типу Me<sub>6</sub>C з довжиною ~8 μm (рис. 2а) і відповідно призвело до формування більш грубих меж зерен. Підвищення швидкості кристалізації розплаву при збільшенні об'ємного вмісту

карбонітридів Ti(C,N), що вводяться до нього у кількостях до 0,050–0,075 %, призводило до формування тонких меж зерен з наявністю дрібних примезових карбідів розміром, що переважно не перевищував 2 мкм (рис. 2б, в).

Наряду із карбідами сферичної морфології в структурі всіх дослідних варіантів виявлені глобулярні карбіди, в місцях розташування котрих спостерігаються зони, що збагачені на ітрій, молібден та титан, та збіднені на хром (рис. 3). Аналіз діаграми стану Y-C, свідчить про те, що формування цих карбідів відбувається в умовах високих температур, близьких до температури ліквіду, забезпечуючи їм тим самим глобулярну морфологію. Результати рентгено-спектрального аналізу показали що, в місцях розташування ітрієвмісних карбідів також виявляються і карбіди титану й молібдену, що дозволяє зробити припущення, що високотемпературні карбіди YC можуть виступати підлогою для зародження на них карбідів низькотемпературних модифікацій типу MC.



**Рисунок 2.** Мікроструктура зразків із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів:  
 а – 0,025 % Ti (C, N); б – 0,050 % Ti (C, N);  
 в – 0,075 % Ti (C, N)



**Рисунок 3.** Результати рентгеноспектрального мікроналізу у типових місцях розташування карбідних фаз

Слід зазначити, що в загальному полі зору об'ємний вміст таких карбідів був значно меншим у порівнянні із частками сферичної морфології. Спостерігається тенденція до зменшення середнього розміру карбідної й карбонітридної складової в сплаві при збільшенні об'єму карбонітридів титану, котрі вводяться в розплав при модифікуванні (табл. 3). При цьому об'ємна частка цих складових ( $I_k$ ) збільшується.

**Таблиця 4** – Середні показники механічних властивостей та часу до високотемпературного руйнування зразків дослідних варіантів модифікування після ГПІ та термічної обробки

Стандартні підрахунки кількісних і розмірних показників інтерметалідної  $\gamma'$ - фази не показали суттєвої її зміни при введенні у розплав дослідного комплексу модифікаторів. Усі показники співставні між собою та знаходяться на одному рівні (табл. 3). Спостерігається деяке зниження середнього розміру  $\gamma'$ - фази при введенні у розплав 0,075 % Ti (C, N).

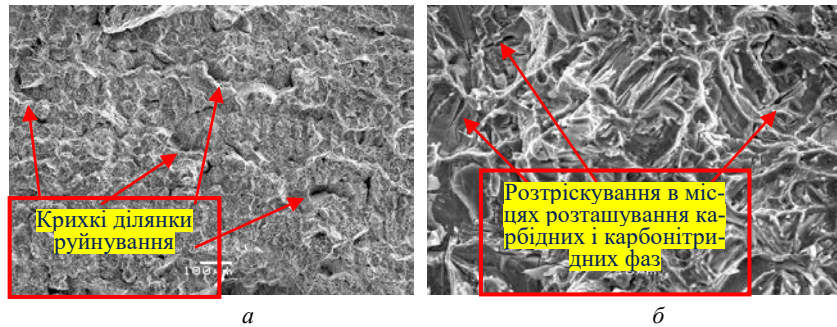
Механічними випробуваннями встановили, що усі дослідні варіанти комплексного модифікування забезпечують рівень механічних властивостей, що відповідає вимогам нормативно-технічної документації (табл. 4). При цьому вплив на пластичність матеріалу більш яскраво виражений, оскільки отримані значення відносного видовження перевищують вимоги більше ніж у два рази. Подібна тенденція спостерігається у випробуваннях на ударну в'язкість, значення котрої перевищували 50 Дж/см<sup>2</sup>. Більші показники ударної в'язкості отримали при введенні у розплав 0,050 % Ti (C, N). В цьому випадку в зламах ударних зразків спостерігали в'язко-крихкий характер руйнування із наявністю в'язкої складової у зонах розташування основного  $\gamma$ - твердого розчину та крихких ділянок сколу у місцях залягання карбідної й карбонітридної складової (рис. 4). Слід зазначити, що злами усіх варіантів характеризувалися внутрішньозеренним руйнуванням і в загальному полі зору зламу частка крихкої складової збільшувалася при збільшенні об'ємної частки карбонітриду титану, що вводився у розплав. Металургійні дефекти в зламах ударних зразків відсутні.

**Таблиця 3** – Параметри структурних складових в зразках, відлитих із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ

Варіант	MC+M(C,N)		$\gamma'$ -фаза	
	$I_k \times 10^{-6}$	$d_{MC+M(C,N)}, \mu\text{m}$	$I_{\gamma'} \times 10^{-6}$	$d_{\gamma'}, \mu\text{m}$
0,025 % Ti(C,N)	498	3,16	784	0,253
0,050 % Ti(C,N)	504	2,02	754	0,243
0,075 % Ti(C,N)	530	1,50	772	0,234

Час до високотемпературного руйнування дослідних модифікованих зразків також відповідав заданим вимогам нормативної документації та суттєво їх перевищував. Зокрема, можна відмітити приблизно однакові значення цього показника в зразках отриманих з 0,025 % Ti(C, N) та 0,075 % Ti(C, N) (~ 300 год). Сприятлива морфологія помезових карбідів та рівномірний розподіл карбонітридної складової за об'ємом матеріалу, вірогідно, наряду із традиційним зміцненням інтерметалідною  $\gamma'$ - фазою, притаманному сплавам цього класу, слугували одним із чинників, котрий сприяв отриманню високих значень часу до руйнування (> 500 год) при комплексному модифікуванні розплаву ітрієм та 0,050 % Ti (C, N).

Варіант	Механічні властивості при T=20°C						Час до руйнування, $\tau_{340}^{850}$ , год.
	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НВ (d, мм)	
0,025 % Ti (C, N)	1175	853	17,6	20,4	50,5	341 (3,30)	283
0,050 % Ti (C, N)	1162	867	18,8	24,5	67,5	341 (3,30)	505
0,075 % Ti (C, N)	1139	852	18,0	22,0	53,5	341 (3,30)	310,5
Норми НТД	≥ 930	-	≥ 7,0	-	≥ 29,0	-	≥ 50,0



**Рисунок 4.** Фрактографічне зображення зламу ударних зразків, характерне для дослідних варіантів комплексного модифікування: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 1500$

Оскільки суттєвого впливу розглянутого комплексу модифікування на кількісні і розмірні показники інтерметалідної  $\gamma'$ - фази не виявлено, а показники механічних властивостей при кімнатній й підвищеній температурах забезпечено на рівні, що суттєво перевищує вимоги нормативної документації на матеріал, то отримані результати підтверджують тези про здатність карбідних фаз чинити позитивний вплив на загальне зміцнення жароміцного сплаву й забезпечення високого рівня пластичності, ударної в'язкості й жароміцності сплаву.

### Висновки

Проведені дослідження по комплексному модифікуванню сплаву ЖСЗДК-VI одночасно ітрієм та ультрадисперсними частинками карбонітриду титану Ti (C, N) перемінного вмісту (від 0,025 % до 0,075 %) при заливанні розплаву у керамічну форму, перший робочий шар якої виконано із застосуванням алюмінату кобальту  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ , дозволили встановити результати, котрі свідчать про значне подрібнення макрозерна у дослідних виливках за рахунок інтенсивного тепловідведення й високої швидкості кристалізації при введенні у розплаву часток тугоплавких сполук. Отримання нормально термообробленої структури дослідних зразків реалізовано через відповідність хімічного складу сплаву, термічної обробки, а гарячим ізостатичним пресуванням майже повністю усунуто внутрішню мікропористість. В структурі дослідного сплаву усіх варіантів спостерігаються карбіди й карбонітриди переважно сферичної морфології, а також дискретно розташовані, глобулярні карбіди  $\text{YS}$ , котрі слугують підло-

жками для формування низькотемпературних модифікацій карбідів  $\text{MC}$ . Модифікування розплаву дослідними комплексами не суттєво впливало на кількісні і розмірні показники зміцнювальної інтерметалідної  $\gamma'$ - фази. Механічні властивості матеріалу комплексно-модифікованих зразків відповідають вимогам, що висуваються нормативною документацією до відповідального жароміцного литва. В матеріалі, після введення у модифікований ітрієм розплаву 0,050 % ультрадисперсних часток карбонітриду титану Ti(C,N), забезпечено високі рівні ударної в'язкості ( $\sim 70$  Дж/см<sup>2</sup>) та часу до високотемпературного руйнування ( $> 500$  год). Для підтвердження достатності отриманого рівня механічних властивостей слід провести технологічні випробування натурних лопаток у складі газотурбінного двигуна згідно вимог авіаційних правил.

### Список літератури

1. Sims, Ch. T. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power (2nd edition) [Текст] / Ch. T. Sims, N.S. Stoloff, W. C. Hagel. – New York: John Wiley & Sons, 1987. – 615 p.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Ч. 2. Лопатки турбины [Текст] / В. А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье : Мотор Сич, 2003. – 420 с.
3. Zhemanyuk, P. D. Structure and properties of cast blades of aircraft engines made of heat-resistant nickel alloy ZhS26-VI after hot isostatic pressing [Текст] / P. D. Zhemanyuk, V. V. Klochikhin, N. A. Lysenko, V. V. Naumik // Visnik dvigunobuduvannya. – 2015. – №. 1. – P. 139–146.
4. Paton, B.E. Heat resistance of casting nickel alloys

- and their protection from oxidation [Текст] / В. Е. Paton, G. B. Stroganov, S. T. Kishkin. – Kyiv: Naukova Dumka, 1987. – 256 p.
5. Development of Ni Base Superalloy for Industrial Gas Turbine [Текст] / I. Okada, T. Torigoe, K. Takahashi, D. Izutsu // Proceedings of the International Symposium on Superalloys. – 2004. – P. 707–712.
6. Shahjman, P. Creep and fatigue crack growth behaviour of some cast nickel-base alloys [Текст] / P. Shahjman, K. Sadanda // Materials Science and Engineering. – 1986. – № A108. – P. 131–140.
7. Development of Ni-based Single Crystal Superalloys for Power-generation Gas-turbine Blades [Текст] / R. Hashizume, A. Yoshinari, Y. Murata, M. Morinaga // Tetsu-to-Hagane. – 2004. – № 90. – P. 518–525.
8. Microstructural Degradation of CMSX-4: Kinetics and Effect on Mechanical Properties / A. Epishin, T. Link, M. Nazmy et al. // Proceedings of the International Symposium on Superalloys. – 2008. – P. 725–731.
9. Ai, S. H. Influence of precipitate morphology on high temperature fatigue crack growth of a single crystal nickel base superalloy [Текст] / S. H. Ai, V. Lupinc, G. Onofrio // Scripta Metall. Mater. – 1993. – Vol. 29. – P. 1385–1390.
10. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and  $\gamma$ -TiAl alloys / M. Perrut, P. Caron, M. Thomas, A. Couret // Comptes Rendus, Physique. – 2018. – № 19. – P. 657–671.
11. Репях, С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям [Текст] / С. И. Репях. – Днепрпетровск : Лира, 2006. – 1056 с.
12. Комплексное влияние технологических операций на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ [Текст] / П. Д. Жеманюк, В. В. Ключихин, Н. А. Лысенко, В. В. Наумик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 12 (63). – С. 68–73.
13. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва [Текст] : навч. пос. / за ред. акад. НАН України В. Л. Найдека. – К. : дім «Вініченко», 2016. – 223 с.
14. Srivastava, R.R Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. [Текст] / R.R. Srivastava, M-S. Kim, J-C. Lee et al. // Journal of material science. – 2014. – № 49 (14). – P. 1–7.
15. Pollock, T.M. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure, and properties [Текст] / T.M. Pollock, S. Tin // J. Propul. Power. – 2006. – № 22(2). – P. 361–374.
16. Erickson, G. L. Polycrystalline Cast Superalloys [Текст] / G. L. Erickson. Materials Park. Ohio: ASM International, 1989. – P. 980–994.
17. Рафінування розплавів жароміцних сплавів при литті деталей ГТД в оболонкові форми, отриманні за пінополістироловими моделями [Текст] / Шинський, О. Й., Квасницька Ю. Г., Максюта І. І. та ін. // Металознавство та обробка металів. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 37–48.
18. Педаш, О. О. Комбіноване модифікування рафінованого жароміцного сплаву ЗМІЗУ-ВІ [Текст] / О. О. Педаш, Е. І. Цивірко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 2. – 13 с.
19. Гнатенко, О.В. Разработка экономно легированного жаропрочного сплава для ответственных отливок [Текст] / О.В. Гнатенко, С.В. Гайдук, В.В. Наумик. // Вісник двигунобудування. – 2012. – №. 1. – С. 206–210.
20. Mitchell, A. Melting and refining of superalloys and titanium alloys [Текст] / A. Mitchell // ISIJ International. – 1992. – Vol. 32, № 5. – P. 557–562.
21. Гречанюк, И.Н. Производство кондиционных слитков из отходов жаропрочных сплавов методом электронно-лучевой плавки [Текст] / зб. пр. XIV Міжнар. наук. конф. / И. Н. Гречанюк // Наука та освіта. – м. Хайдусобосло (Угорщина), 2020. – С. 27–30.
22. Кузнєцова, Т. Л. Особливості перспективної комплексної безвідходної технології виплавки ливарних жароміцних нікелевих сплавів [Електронний ресурс]: мат-ли 20-ї, 13-ї Ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф. / Т. Л. Кузнєцова, М. П. Бродніковський // Литво-Металургія. – Харків, Київ (Україна), 2024. – С.140–144.
23. Reed, R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications [Текст] / R. C. Reed. – UK.: Cambridge University Press, 2006. – 372 p.
24. Hot isostatic pressing improves the quality of the blades from nickel base superalloys for turbine engines [Текст] / I. M. Razumovskii, A. A. Tikhonov, S. F. Marinin, A. V. Logunov // Adv. Mat. Res. – 2011. – № 278. – P. 295–300.
25. Лысенко, Н. А. Влияние ГИП на структуру и свойства монокристаллических лопаток из сплава ЖС26-ВИ [Текст] / Н. А. Лысенко, В. В. Ключихин, Э. И. Цивирко // Вісник двигунобудування. – 2010. – №. 1. – P. 133–139.
26. Сергієнко, О. С. Вплив гарячого ізостатичного пресування на структуру та механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів [Текст] / О. С. Сергієнко, Г. А. Бялік // Металл и литье Украины. – 2011. – № 2 (213). – С. 5–6.
27. Klochikhin, V. Structure and properties of heat-resistant nickel alloys castings after hot isostatic pressing [Текст]: // Mat. Sci. and Techn. Conf. and Exhibition / Klochikhin V., Lysenko N., Naumyk V. // MS&T17. – Pittsburgh, Pennsylvania (USA), 2017. – P. 1370–1374.
28. Hot isostatic pressing in the manufacture of ZhS3DK-VI alloy turbine blades with 50% returns in the charge [Текст] / V. V. Klochykhin, O. O. Pedash, S. M. Danilov et al. // Strength of Materials. – 2022. – Vol. 54, № 6. – P. 1043–1049.
29. Качество отливок рабочих лопаток турбины, модифицированных наночастицами тугоплавких соединений и обработанных ГИП [Текст] / А. Я. Качан, Н. А. Лысенко, А. С. Дудников, С. А. Уланов // Вісник двигунобудування. – 2014. – № 1. – С. 75–81.
30. Модифицирование жаропрочных сплавов ультрадисперсными порошками [Текст] / А.В. Богуслав,

В. В. Клочихин, Н. А. Лысенко и др. // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 1. – С. 47–51.

31. Підвищення структурної стабільності та властивостей жароміцних нікелевих сплавів для лопаток ГТД обробкою наноматеріалами [Текст] / М. Грекова, Н. Калинина, В. Калинин та ін. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – №8. – С. 60–65.

32. Structure and some properties of alloy ZHS6K with yttrium [Текст] // V.P. Valuev, M.M. Zakharov, L.A. Panyushin et al. – 1980. – Vol. 22. – P. 281–282.

33. Влияние лантана и иттрия на жаростойкость монокристаллов из жаропрочных высокорениевых никелевых сплавов [Текст] / В.В. Сидоров, Н.В. Перушин, А.В. Макеев и др. // Авиационные материалы и технологии. – 2005, №. 1. – С. 7–15.

34. Binczyk, F. Macrostructure of IN-713C superalloy after volume modification [Текст] / F. Binczyk, J. Sleziona // Archives of foundry engineering. – 2009. – Vol. 9, Iss. 2. – P. 105–108.

35. Калініна, Н.Е. Комплексное модифицирование сложнолегированных жаропрочных сплавов [Текст] / Н.Е. Калініна, А.Е. Юхименко, В.Т. Калінін // Вісник двигунобудування. – 2014. – № 2. – С. 181–185.

36. Binczyk, F. Modification of macrostructure of nickel superalloys with cobalt nanoparticles [Текст] / F. Binczyk, J. Sleziona, P. Gradoń // Kompozyty. – 2011. – Vol. 11, №1. – P. 49–54.

37. Zielińska, M. Surface modification, microstructure and mechanical properties of investment cast superalloy [Текст] / Zielińska, M., Kubiak, K., Sieniawski, J. // Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. – 2009. – Vol. 35. – P. 55–62.

38. Комбинированное модифицирование при получении деталей турбин ГТД [Текст] / П.Д. Жеманюк, А.А. Педаш, Э.И. Цивирко, А.Ф. Педаш // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 75–78.

39. Investigation on reduction of  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  by hydrogen gas using TGA [Текст] / J.A. Bustnes, N.N. Viswanathan, D. Sichen et al. // Metal Mater Trans. – 2000. – Vol. B 31. – P. 540–542.

40. Педаш, А. А. Повышение теплопроводности литейной керамической формы алюминатом кобальта [Текст] / А. А. Педаш, Г. А. Бялик, Э. И. Цивирко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10. – С. 40–44.

Одержано 08.11.2024  
Після дробки 13.11.2024

## COMPLEX MODIFICATION OF NICKEL-BASED SUPERALLOY WITH ULTRA-FINE REFRACTORY COMPOUNDS PARTICLES

Serhii Danylov	Postgraduate student of the Department Machinery and Technology of Foundry National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : Dankar1378@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8087-9638
Pedash Oleksii	Candidate of technical sciences, Department chief of JSC «Motor Sich», Zaporizhzhya, Ukraine, <i>e-mail</i> : tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0003-1231-9951
Valeriy Naumyk	Doctor of technical sciences, Professor, Vice-Rector for Research and International Affairs National University Zaporizhzhya Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : vnaumyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0657-4510
Dmytro Tomkin	Postgraduate student of the Department Machinery and Technology of Foundry National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : tajdv678@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4042-4452
Olena Naumyk	Postgraduate student of the Department Machinery and Technology of Foundry National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : enaumyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1963-1836

**Purpose.** Due to the complex modification of nickel-based superalloy with modifiers of different mechanisms of action, it is possible to increase the characteristics of plasticity and impact strength to a level that will allow to localize the possible destruction of large-sized blades of a low-pressure turbine of an aircraft engine during operation cycle.

**Research methods.** Microstructure analysis and phase content investigation was carried out with optical and scanning electronic metallography on optical and electronic microscope respectively.

**Results.** A study was conducted on the complex modification of the ЖСЗДК-ВІ alloy with yttrium and particles of ultradispersed titanium carbonitrides  $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$  with variable content (from 0.025 % to 0.075 %), when pouring the melt into a ceramic mould, the first working layer of which was made with cobalt aluminate  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  addition. In the structure of samples of experimental variants, along with carbides of spherical morphology, globular carbides were found, in the locations of which, zones enriched in yttrium, molybdenum, and titanium, and depleted in chromium, were observed. The results allow to make an assumption that, probably, high-temperature primary carbides of the YC-type serve as substrates

for the formation of low-temperature modifications of MC carbides. In the material, after addition 0.050% ultrafine particles of titanium carbonitrides Ti(C,N) into the yttrium-modified melt, high levels of impact toughness ( $\sim 70 \text{ J/cm}^2$ ) and rupture life ( $> 500 \text{ h}$ ) are provided.

**Scientific novelty.** New data were obtained regarding the phase state of the ЖСЗДК-ВІ alloy after complex modification according to the scheme  $(\text{Ti}(\text{C},\text{N})+\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4)$ . The fine structure of a nickel-based superalloy, which is traditionally used for large-sized turbine blades production of a gas turbine engine for aviation purposes, has been studied.

**Practical value.** The obtained results expand the possibilities of using heat-resistant ЖСЗДК-ВІ alloy for responsible castings production.

**Key words:** superalloy, microstructure, modification, titanium carbonitride, yttrium, cobalt aluminate, heat treatment.

## References

1. Sims, Ch. T., Stoloff, N. S., Hagel W. C. (1987). *Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power* (2nd edition). New York: John Wiley & Sons, 615 p.
2. Boguslayev, V. A., Muravchenko, F. M., Zhemanuk, P. D., Yatzenko, V.K., Kachan, A.Ya, Tzivirko, E. I., Belikov, S. B., Orlov, M. R., Zamkovoy, V. Ye., Mozhgovoy, V. F., Rubel O. V. (2003). Tekhnologicheskoye obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley GTD. Lopatki turbiny [Technological support of gas turbine engine parts performance. P. 2 «Turbine blades»], Zaporozhye: "Motor Sich", 420.
3. Zhemanuk, P. D., Klochikhin, V. V., Lysenko, N. A., Naumik V.V. (2015). Structure and properties of cast blades of aircraft engines made of heat-resistant nickel alloy ZhS26-VI after hot isostatic pressing. *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 139–146.
4. Paton, B. E., Stroganov, G. B., Kishkin, S. T., et al. (1987). Heat resistance of casting nickel alloys and their protection from oxidation. Kyiv: Naukova Dumka, 256 p.
5. Okada, I., Torigoe, T., Takahashi, K., Izutsu, D. (2004). Development of Ni Base Superalloy for Industrial Gas Turbine. *Superalloys*, 2004, 707–715.
6. Shahjman, P., Sadanda, K. (1986). Creep and fatigue crack growth behaviour of some cast nickel-base alloys. *Materials Science and Engineering*, A108, 131–140.
7. Hashizume, R., Yoshinari, A., Murata, Y., Morinaga, M. (2004). Development of Ni-based Single Crystal Superalloys for Power-generation Gas-turbine Blades. *Tetsu-to-Hagane*, 90, 518–525.
8. Epishin, A., Link, T., Nazmy, M., Staubli, M., Klinghoffer, H., Nolze, G. (2008). Microstructural Degradation of CMSX-4: Kinetics and Effect on Mechanical Properties. *Proceedings of the International Symposium on Superalloys*, 725–731.
9. Ai, S. H., Lupinc V., Onofrio G. (1993). Influence of precipitate morphology on high temperature fatigue crack growth of a single crystal nickel base superalloy. *Scripta Metall. Mater.*, 29, 1385–1390.
10. Perrut, M., Caron, P., Thomas M., Couret A. (2018). High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and  $\gamma$ -TiAl alloys. *Comptes Rendus, Physique*, 19, 657–671.
11. Repiakh, S. I. (2006) *Tehnologicheskie osnovy litia po vyplavlaiemym modeliam* [Technological basics of investment casting], Dnepropetrovsk:Lira, 1056.
12. Zhemanuk, P. D., Klochikhin, V. V., Lysenko, N. A., Naumik, V. V. (2013). Kompleksnoie vliyaniye technologicheskikh operatziy na structure i svoistva zharoprochnogo nikelievogo splava [Complex influence of technological operations on structure and properties of ЖСЗДК-ВІ superalloy], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 12 (63), 68–73.
13. Verkhovliuk, A.M., Narivskiy, A.V., Mogilatenko, V.G. (2016). Tehnologii oderzhannia metaliv ta splaviv dlia lyvarnogo vyrobnytstva [Technologies of obtaining metals and alloys for foundry production], Under V.L. Naydek red., Kyiv: Vynnychenko, 223 p.
14. Srivastava R.R., Kim, M-S., Lee, J-C., Jha, M.K., Kim, B-S (2014). Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of material science*, 49 (14), 1–7.
15. Pollock, T.M., Tin, S. (2006). Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure, and properties. *J. Propul. Power*, 22(2), 361–374.
16. Erickson, G. L. (1989). *Polycrystalline Cast Superalloys*, ASM International: Materials Park.Ohio, 980–994.
17. Shynskiy O. Y., Maksyuta Y. Y., Kvasnytskaia Yu. H., Mikhnian E. V., Neima A. V. (2020). Rafinuvannia rozplaviv zharomitsnykh splaviv pry lytti detalei HTD v obolonkovi formy, otrymanni za pinopolistyrolovymy modeliamy [Refining melts of heat-resistant alloys during casting of GTE details in shell forms obtained by foamed polystyrene models]. *Material science and heat-treatment of metals*, 1, 37–48.
18. Pedash, O. O., Tzivirko, E. I. (2008). Kombinovane modyfikuvannia rafinovanogo zharomitznogo splavu 3M13U-BI [Combined modification of refined heat-resistant alloy ZM13U-VI]. *Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2, 8–13.
19. Gnatenko, O., Gayduk, S., Naumyk, V. (2012). Razrabotka ekonomnolegirovannogo zharoprochnogo splava dlia otvetstvennykh otlivok [Development of economically alloyed heatproof alloy for the responsible casts], *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 206–210.
20. Mitchell, A. (1992). Melting and refining of superalloys and titanium alloys. *ISIJ International*, 32 (5), 557–562.
21. Grechianuk, I.N. (2020) *Proizvodstvo konditsionnykh slitkov iz othodov zharoprochnykh splavov metodom electronno-luchevoy plavki* [Production of heat-resistant alloy waste ingots by electron beam remelting], *Proceed. Of XIV Int. conf. Science and Education*, 27–30.



22. Kuznetsova, T. L., Brodnikovskiy M. P (2024). Osoblyvosti perspektivnoyi kompleksnoyi bazvidhodnoyi tehnologii vyplavki lyvarnykh zharomitzhykh splaviv [Features of the perspective integrated wasteless technology of cast superalloys melting], Proceed. of conf. "Casting-Metallurgy", 140–144.
23. Reed, R. C. (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, UK, 372.
24. Razumovskii, I. M., Tikhonov, A. A., Marinin, S. F., Logunov, A. V. (2011). Hot isostatic pressing improves the quality of the blades from nickel base superalloys for turbine engines. *Adv. Mat. Res.*, 278, 295–300.
25. Lysenko, N. A., Klochikhin, V. V., Tzivirko, E. I. (2010). Vliyaniye GIP na strukturu i svoystva monokristallicheskikh lopatok iz splava ZhC26-BII [Influence of hot isostatic pressing on the structure and properties of monocrystal blades of ZhC26-BII alloy], *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 133–139.
26. Serhiyenko, O. S., Byalik, G. A. (2011). Vplyv gariachogo izostatychnogo presuvannya na structure ta mechanichni vlastyvosti zharomitsnykh nikelevykh splaviv [Effect of hot isostatic pressing on structure and mechanical properties of nickel superalloys], *Metal and casting of Ukraine*, 2 (213), 5–6.
27. Klochikhin, V., Lysenko, N., Naumyk, V. (2017). Structure and properties of heat-resistant nickel alloys castings after hot isostatic pressing, *Mat. Sci. and Techn. Conf. and Exhibition*, 2, 1370–1374.
28. Klochykhin, V. V., Pedash, O. O., Danilov, S. M., Tyomkin, D. O., Naumyk, O. O., Naumyk V. V. (2022). Hot isostatic pressing in the manufacture of ZhS3DK-VI alloy turbine blades with 50 % returns in the charge. *Strength of Materials*, 54(6), 1043–1049.
29. Kachan, A.Ya., Lysenko, N. A., Dudnikov, A. S., Ulanov S. A. (2014). Kachestvo otlivok rabochikh lopatok turbiny, modifitirovannykh nanochastitzami tugoplavkikh sojedineniy i obrabotannykh GIP [Quality of cast turbine blades, modified with the nanoparticles of refractory compounds and treated by HIP], *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 75–81.
30. Boguslaiev, A. V., Klochikhin, V. V., Lysenko, N. A., Dubrov, G. L., Tyomkin D. O. (2008). Modifitirovaniye zharoprochnykh splavov ultradispersnyimi poroshkami [Modification of superalloys with nanosized powders], *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 47–51.
31. Grekova, M. V., Kalinina, N. E., Kalinin, T. V., Guchenkov, M. V., Djur, Y. O., Dudnikov A. S. (2018). Pidvishennia strukturnoy stabilnosti ta vlastyvoستي zharomitznykh nikelevykh splaviv dlia lopatok GTD obrobkoyu nanomaterialamy [Increase of structural stability and properties of heat-resistant nickel alloys for GTE shooters by nanomaterial treatment] *Aerospace technic and technology*, 8, 2018, 60–65.
32. Valuev, V. P., Zakharov, M. M., Panyushin, L. A., Tsai S. A. (1980). Structure and some properties of alloy ZHS6K with yttrium. *Heat-Resistant Steels and Alloys*, 22, 281–282.
33. Sidorov, V.V., Petrushin, N.V., Makeev, A.V., Tchabina, Ye. B., Kalmykova, N.A. (2005). Vliyaniye lantana i itriya na zharostoykost' monokristalov iz zharoprochnykh vysokoreniyevykh nikelevykh splavov [Influence of lanthanum and yttrium on heat resistance of single-crystals made from high-rhenium nickel superalloys.]. *Aviation materials and technologies*, 1, 7–15.
34. Binczyk, F., Sleziona J. (2009). Macrostructure of IN-713C superalloy after volume modification, *Archives of foundry engineering*, 9(2), 105–108.
35. Kalinina, N.E., Yukhymenko, A.E., Kalinin, V.O. (2014). Kompleksnoye modifitirovaniye slozhnolegirovannykh zharoprochnykh splavov [An integrated modification of difficult doped heat resistance of alloys], *Herald of aeroenginebuilding*, 2, 2014, 181–185.
36. Binczyk, F., Sleziona, J., Gradoń P. (2011) Modification of macrostructure of nickel superalloys with cobalt nanoparticles. *Kompozyty*, 11–1, 49–54.
37. Zielińska, M., Kubiak, K., Sieniawski, J. (2009). Surface modification, microstructure and mechanical properties of investment cast superalloy. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 35, 55–62.
38. Zhemanyuk, P. D., Pedash, A.A., Tzivirko, E.I., Pedash, A.F. (2013). Kombinirovannoye modifitirovaniye pri poluchenii detaley turbin GTD [Combined inoculation in production of GTE turbine parts] *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 2013, 75–78.
39. Bustnes, J.A., Viswanathan, N.N., Sichen, D. et al. (2000). Investigation on reduction of  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  by hydrogen gas using TGA. *Metal Mater Trans.*, B 31, 540–542.
40. Pedash, A., Byalik, G., Tzivirko, E. (2015). Povysheniye teploprovodnosti liteynoy keramicheskoy formy aluminatom kobalta [Increasing of the ceramic casting mould thermal conductivity with cobalt aluminate], *Aerospace technic and technology*, 10, 2015, 40–44.