



КВАСНИЦЬКА

Юлія Георгіївна — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу спеціальних сталей і сплавів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України

ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ І ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИТИХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

За матеріалами доповіді на засіданні
Президії НАН України 3 липня 2024 року

У доповіді наведено результати фундаментальних і прикладних досліджень, проведених у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України, щодо одержання складнопрофільних деталей газотурбінних двигунів нового покоління. Розроблено наукові й технологічні засади процесів отримання нових жароміцних корозійностійких сплавів з поліпшеними характеристиками. Встановлено закономірності впливу легувальних елементів на фазово-структурну стабільність сплавів. Створено нові склади вогнетривких матеріалів для тиглів, керамічних форм, стрижнів та фільтрів.

Ключові слова: жароміцний сплав, газотурбінний двигун, лопатка турбіни, корозія, вакуумно-індукційна плавка, спрямована кристалізація вилків, швидкість охолодження, керамічні тиглі.

Україна є однією з небагатьох країн світу, що мають повний цикл створення газотурбінних двигунів. Широковідомими є такі великі центри газотурбобудування, як ПАТ «Мотор Січ», ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка», АТ «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»—«Машпроект».

Провідні світові компанії — виробники газотурбінних двигунів (ГТД), такі як Siemens, General Electric, Rolls-Royce, Pratt & Whitney, так само, як і українські підприємства газотурбобудівної галузі, постійно працюють над створенням нових видів двигунів та модернізацією тих, що вже випускаються серійно, намагаючись підвищити їх потужність та економічність.

Як свідчення конкурентоспроможності українських газотурбінних двигунів на рис. 1 наведено результати порівняльного аналізу стаціонарних і суднових ГТД виробництва провідних іноземним фірм і ДП НВКГ «Зоря»—«Машпроект». Як бачи-

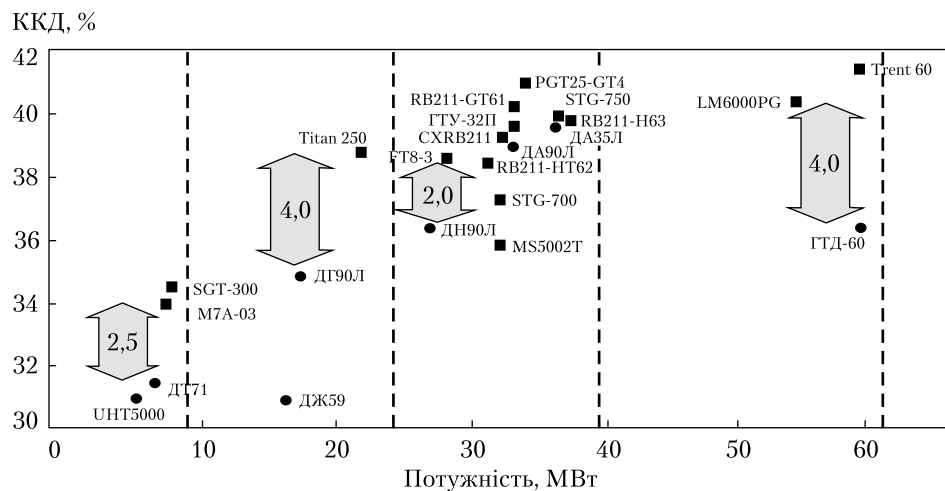


Рис. 1. Порівняння різних типів стаціонарних і суднових ГТД виробництва: ● — ДП НВКГ «Зоря»—«Машпроект»; ■ — закордонних виробників

Таблиця 1. Порівняння параметрів газотурбінного двигуна UGT-25000 із закордонними аналогами

Тип установки (фірма-розробник)	Потужність (за ISO), МВт	ККД, %	Витрати газу, кг/с	Ресурс до капітального ремонту, год	Повний ресурс, год
UGT-25000 (НВКГ «Зоря»—«Машпроект»)	26,2	35,7	90	25000	100000
FT 8 (Pratt & Whitney)	25,5	38,1	85	50000	240000
PB211-6556 (Rolls-Royce)	25,4	35,0	92	25000	100000
PG 5371 PA (General Electric)	26,3	28,5	122	40000	160000
RB211-6761 (Rolls-Royce)	31,8	39,1	94	50000	240000

мо, вітчизняні двигуни за ККД і потужністю не поступаються закордонним аналогам.

У табл. 1 наведено порівняння параметрів сучасного промислового енергетичного газотурбінного двигуна UGT-25000 розробки ДП НВКГ «Зоря»—«Машпроект» з аналогічними за класом ГТД закордонних компаній.

Отже, всі виробники ГТД прагнуть збільшити ресурс і підвищити надійність своїх двигунів, а цього можна досягти збільшенням робочих температур на вході в турбіну,

Проведене оцінювання міцності й довготривалості роботи деталей серійних двигунів засвідчило необхідність поліпшення експлуатаційних характеристик робочих лопаток 1-го і 2-го ступенів турбіни. Зокрема, потрібно не лише підвищувати робочу температуру лопаток, а й забезпечити фазово-структурну стабільність деталей при тривалому ресурсі роботи (до 100 000 годин).

Інше завдання полягає в збереженні високої корозійної стійкості матеріалів в умовах впливу на деталі двигунів продуктів згоряння важкого палива та солей морської води.

Порівняльні характеристики міцності різних жароміцних сплавів, які використовують для виготовлення робочих лопаток турбін, представлено на рис. 2 параметричними кривими Ларсена—Міллера (P):

$$P = (t + 273) \cdot (c + \lg \tau) \cdot 10^3,$$

де t — температура ($^{\circ}\text{C}$); c — стала, яка для хромо-нікелевих сплавів дорівнює 20; τ — час до руйнування.

Відповідно до технічних завдань конструкторських розробок, для підвищення потужності ГТД необхідно забезпечити стаціонарну роботу двигуна за температури газу на вході в турбіну 1150—1200 $^{\circ}\text{C}$. Одним із технологічних прийомів досягнення цієї мети є створен-

ня лопаток зі спрямованою і монокристалічною структурою металу.

З гістограми, наведеної на рис. 3, видно, що в разі спрямованої кристалізації матеріалу деталі мають робочу температуру на 60–80 °С вищу порівняно з деталями з полікристалічною структурою сплаву.

Висока температура й тривалий контакт розплав — форма зумовлюють підвищені вимоги до матеріалу самої форми.

Для поліпшення експлуатаційних характеристик литих лопаток турбін ми виокремили як перспективні такі напрями досліджень:

1) розроблення нових жароміцних сплавів із поліпшеними властивостями;

2) створення модифікованої кераміки для виготовлення термо- і хімічностійких тиглів, форм, стрижнів, фільтрів;

3) рафінування розплаву для очищення його від неметалевих включень та шкідливих домішок;

4) вдосконалення технологічних процесів одержання литих лопаток газотурбінних двигунів.

Для створення нового жароміцного сплаву як базовий було обрано корозійностійкий сплав CM88Y (табл. 2), з якого виготовляють робочі лопатки 1-го і 2-го ступенів турбіни високого тиску промислових ГТД. Він має тривалу міцність 280 МПа за температури 900 °С протягом 100 годин.

З метою поліпшення експлуатаційних властивостей створюваного жароміцного сплаву як перспективні для додаткового легування було

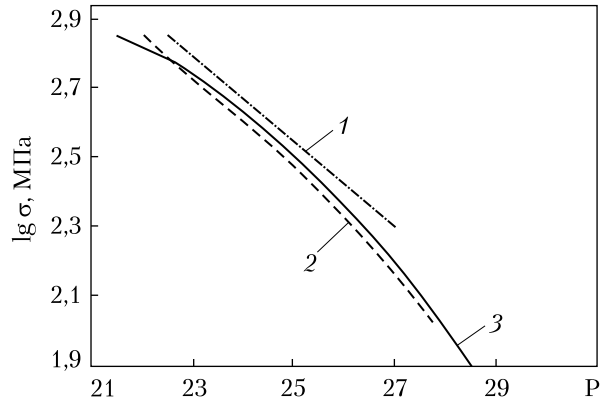


Рис. 2. Порівняння тривалої міцності різних жароміцних сплавів, які використовують для виготовлення робочих лопаток турбін. Марки сплавів: 1 — IN792; 2 — IN738; 3 — CM88Y

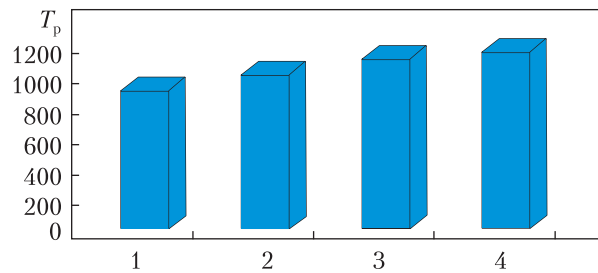


Рис. 3. Залежність робочої температури литих лопаток ГТД від макроструктури сплаву: 1 — полікристалічна структура; 2 — спрямована кристалізація; 3 — монокристалічна структура; 4 — монокристалічна структура безвуглецевих сплавів

Таблиця 2. Вміст основних хімічних елементів у жароміцних сплавах на нікелевій основі, які використовують для виробництва деталей промислових ГТД (% мас.)

Марка сплаву	Cr	Co	Mo	Re	W	Al	Ti	Ta	Nb	Hf
IN 738LC	16,0	8,5	1,7	—	2,6	3,4	3,4	3,4	0,9	—
CMSX-11C	14,9	3,0	0,4	—	4,5	3,4	4,2	5,0	0,1	0,04
SC PWA 483	12,8	9,0	1,9	—	3,8	3,6	4,1	5,0	—	—
Rene 80H	14,1	9,2	4,0	—	4,0	3,1	4,7	—	—	0,74
DC GTD 111	14,0	9,5	1,5	—	3,8	3,0	4,9	2,8	—	0,15
CMSX-4	6,5	9,6	0,6	3,0	6,4	5,6	1,0	6,5	—	0,10
CM88Y	15,9	11,0	1,9	—	5,3	3,05	4,6	—	0,2	0,30

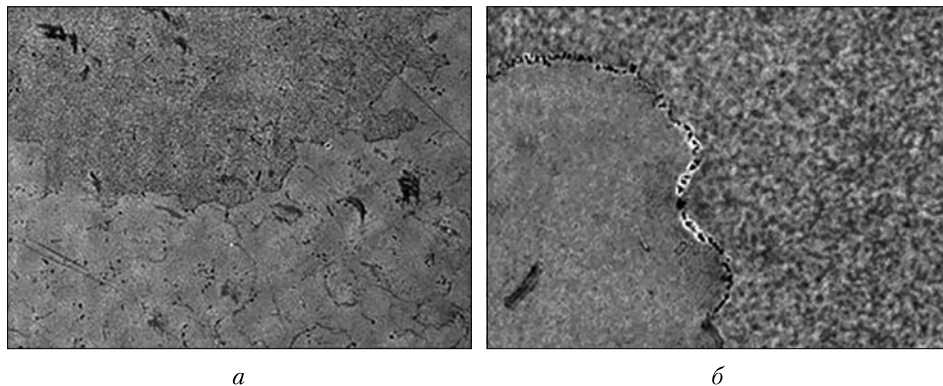


Рис. 4. Мікроструктура зразків експериментального сплаву в литому стані; збільшення: *a* – $\times 200$; *б* – $\times 2000$

обрано такі елементи, як реній і тантал. Для порівняння в табл. 2 наведено хімічні склади закордонних аналогів сплаву CM88Y, наприклад сплаву CMSX-4, який містить 3 % ренію та 6,5 % танталу і має тривалу міцність 480 МПа за температури 900 °С протягом 100 годин.

Одночасне легування ренієм і танталом забезпечує зниження дифузійної рухливості елементів у сплаві, особливо за високих температур, значне зміцнення твердого розчину і стабілізацію зміцнювальної γ' -фази.

Поряд із класичним металофізичним підходом до вибору оптимального складу сплаву для отримання первинного комплексу фізико-хімічних та фазово-структурних характеристик ми застосовували такі розрахункові методи і засоби:

1) лінійний регресійний аналіз на основі експериментальних даних для оцінки якісного впливу хімічних елементів на величини робочих характеристик;

2) програму PHASOMP для визначення на основі даних про хімічний склад сплаву концентрації електронних вакансій N_v для запобігання утворенню топологічно щільноупакованих фаз (відомо, що $N_v \leq 2,4$);

3) програму SPACe, version 4 (Superalloy Phase Analysis Computation Engineering) для визначення прогнозованих критичних температур та властивостей досліджуваних сплавів на основі даних про їхній хімічний склад.

Отже, було науково обґрунтовано створення нового жароміцного корозійностійкого сплаву для виготовлення робочих лопаток турбін

енергетичних та суднових ГТД. Цей сплав забезпечує високий рівень фазово-структурної стабільності профільних виливків відповідального призначення. При цьому легування одночасно танталом і ренієм у визначених кількостях дозволяє зменшити концентрацію хрому в сплаві.

З використанням методу диференційно-термічного аналізу встановлено температури фазових переходів експериментальних зразків, а саме: температуру солідус $T_S = 1320$ °С і температуру ліквідус $T_L = 1370$ °С. Слід зазначити, що для сплаву CM88Y ці показники є на 50 °С нижчими. Температура повного розчинення γ' -фази у зразках з розробленого сплаву підвищується на ~ 50 °С (до 1220 °С).

Поліпшення механічних властивостей запропонованого сплаву забезпечується завдяки утворенню значної (45–50 % об.) кількості γ' -фази (Ni_3Al (Ti, Ta, Nb)) і дисперсному зміцненню γ -твердого розчину кобальтом, хромом, молібденом, вольфрамом та ренієм.

Фізико-механічні властивості й тривала міцність нового сплаву на 15–20 % перевищують аналогічні показники базового сплаву CM88Y, а довготривала міцність с'ягає 330 МПа за температури 900 °С протягом 100 годин.

На рис. 4 показано мікроструктуру зразків розробленого нами сплаву в литому стані.

Було також проведено тигельні та стендові дослідження стійкості до високотемпературної сольової корозії експериментального сплаву порівняно з серійним сплавом CM88Y. Під час випробувань зразки встановлювали на ви-

ході жарової труби, яка імітує умови хімічного й теплового впливу потоку продуктів згоряння дизельного палива, що містить суміш солей NaCl і Na_2SO_4 (рис. 5).

Високотемпературні дослідження корозійної стійкості експериментального матеріалу на газодинамічному стенді показали, що корозійне пошкодження його міжзеренних меж становить у середньому 0,15–0,25 мм, що не перевищує глибини пошкоджень у зразках із серійного сплаву CM88Y (рис. 6).

Крім того, результати рентгеноструктурного аналізу засвідчили, що окалина з нового сплаву після стендових випробувань містить поряд із захисними оксидами Ni та Cr також і оксид Ta . Слід зазначити, що оксид танталу не взаємодіє з сульфатом натрію, на відміну від оксидів молібдену, вольфраму і ніобію, які реагують з Na_2SO_4 та сприяють розчиненню оксиду нікелю. Тому наявність оксиду танталу сприяє утворенню на поверхні зразка захисної плівки, що істотно знижує швидкість високотемпературної корозії.

Легування танталом у кількості 2,5–4,3 % мас. зумовлює утворення в структурі експериментального сплаву карбідів (типу TaC), внаслідок чого частково блокується виділення Cr_{23}C_6 . Тому значна кількість хрому залишається в γ -твердому розчині, а на поверхні утворюється захисна плівка, що містить оксиди хрому і танталу.

Отже, турбінні лопатки, виготовлені з нового сплаву, матимуть підвищену корозійну стійкість в агресивних середовищах.

Крім того, ми дослідили характеристики втомної міцності лопаток 2-го ступеня ГТД, виплавлених з нового сплаву. Встановлено, що експериментальний сплав має параметри руйнівного навантаження на базі $2,0 \cdot 10^7$ циклів, що відповідає технічним умовам.

Таким чином, розроблений нами сплав, зважаючи на його вищі характеристики щодо жароміцності та корозійної стійкості, можна рекомендувати для виготовлення робочих лопаток 1-го і 2-го ступенів ГТД.

Як відомо, в разі низьких швидкостей кристалізації у сплаві виникають структурні де-

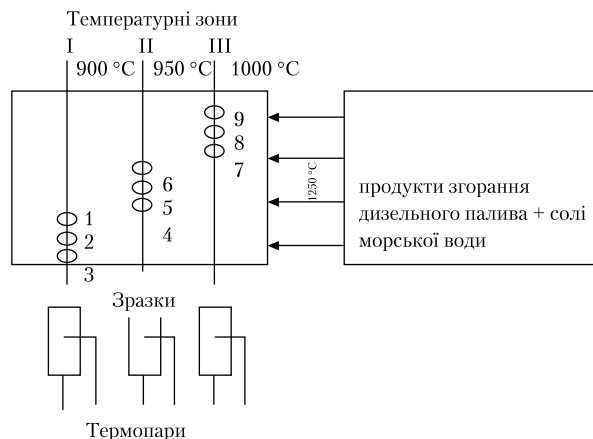
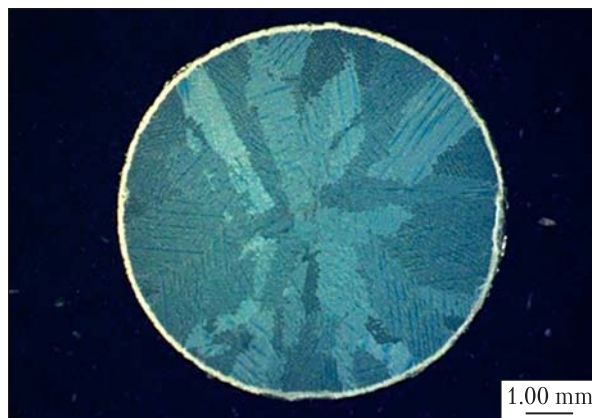
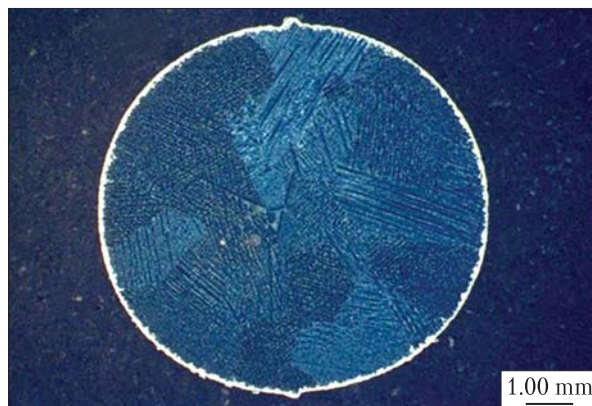


Рис. 5. Схема стенду 9У343 для випробувань на високотемпературну корозію і розміщення зразків у газосольовому потоці



a



б

Рис. 6. Макроструктура зразків сплавів після випробувань на високотемпературну корозію: *a* — сплав CM88Y ; *б* — розроблений сплав

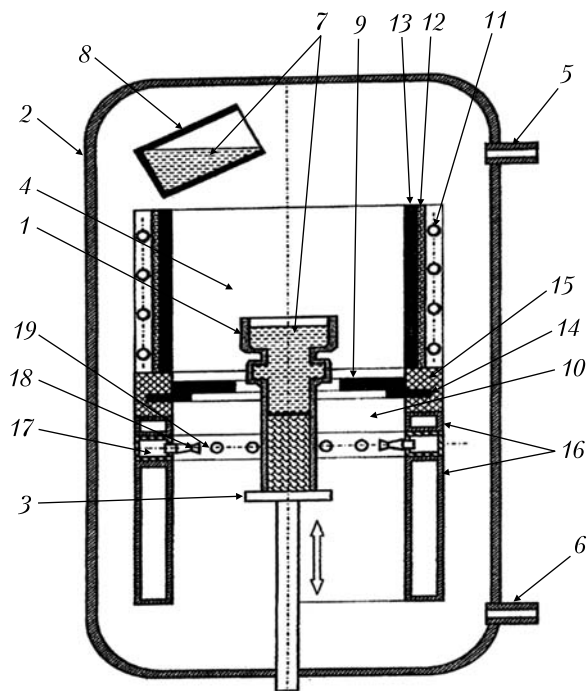


Рис. 7. Схема модернізованого ливарного процесу для отримання виливків лопаток газових турбін з регулярною структурою: 1 – ливарна форма; 2 – вакуумний кожух; 3 – кристалізатор; 4 – зона нагрівання; 5 – труба для кріплення до вакуумної установки; 6 – труба для додаткового розвантаження зони охолодження робочої камери; 7 – розплав; 8 – тигель; 9 – теплоізоляційний екран; 10 – зона охолодження; 11 – індуктори зони нагрівання; 12 – теплоізоляція; 13 – графітова муфельна піч; 14 – стопорне кільце; 15 – циліндрична стінка теплоізоляційного екрана; 16 – кожух; 17 – кільцевий газозбірник; 18 – газові інжектори; 19 – отвори для газових інжекторів

фекти, наприклад ліквідаційні смуги. Для того, щоб підвищити швидкість кристалізації і, відповідно, забезпечити регулярну структуру виливків лопаток газових турбін, було запропоновано модернізовану конструкцію ливарної установки VIM-25-175С вертикального типу (виробник – Seco-Warwick, Польща).

Вдосконалення установки (рис. 7) полягало у введенні вузла додаткового охолодження потоком інертного газу (аргону) для отримання оптимально орієнтованої структури. Пристрій для подання струменів інертного охолоджувального газу виконано у вигляді кільцево-

го газового колектора, оснащеного газовими ежекторами.

Застосування такого способу охолодження інтенсифікує процес кристалізації розплаву, змінюючи градієнт температури на фронті кристалізації порівняно з конвективним охолодженням у вакуумі, і завдяки наявності мідного піддона істотно змінює кінетику структуроутворення. В процесі спрямованої кристалізації з радіаційним способом охолодження відведення тепла від виливка здійснюється через водоохолоджувальну металеву плиту – «холодильник» унаслідок теплопровідності і випромінювання від зовнішньої поверхні керамічної форми на холодні стінки печі. Зі збільшенням висоти затверділого шару металу передача тепла в «холодильнику» сповільнюється. Коли затверділий шар досягає товщини ≥ 70 мм від поверхні водоохолоджувальної плити, виливок охолоджується переважно випромінюванням від бічних поверхонь форми.

Отже, розроблено технологію виплавляння лопаток 2-го ступеня енергетичного газотурбінного двигуна з нового жароміцного сплаву. При цьому макроструктура всіх перерізів є регулярною і відповідає вимогам до структури лопаток 2-го ступеня ГТД та технічному регламенту (рис. 8).

Підвищення параметрів міцності й термостійкості, а також зменшення пористості кераміки можна досягти введенням у керамічну масу модифікаторів. Це особливо важливо в разі спрямованого тверднення, оскільки тривалий контакт розплав–форма висуває підвищені вимоги до матеріалу форми.

Al- і Si-модифікатори, які є складовими вибраного керамічного наповнювача і в'язучого, що використовують для форм та стрижнів, дозволяють у процесі термооброблення форм перевести оксид кремнію в алюмосилікат – муліт, який є найбільш термостабільною складовою вогнетривкої композиції. В такий спосіб, завдяки модифікації в'язучого формувальної суміші, можна мінімізувати шкідливий вплив SiO_2 на поверхню виливка.

Лопатки зазвичай одержують методом литва в корундові форми. Експериментально виявле-

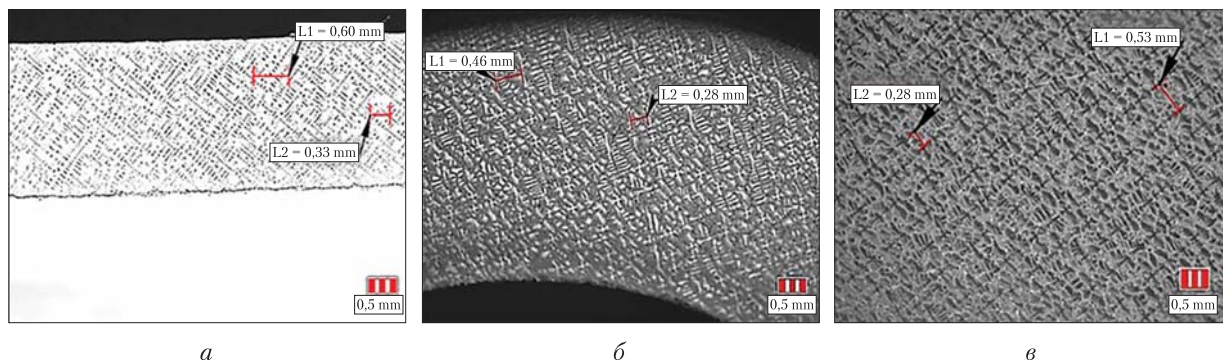
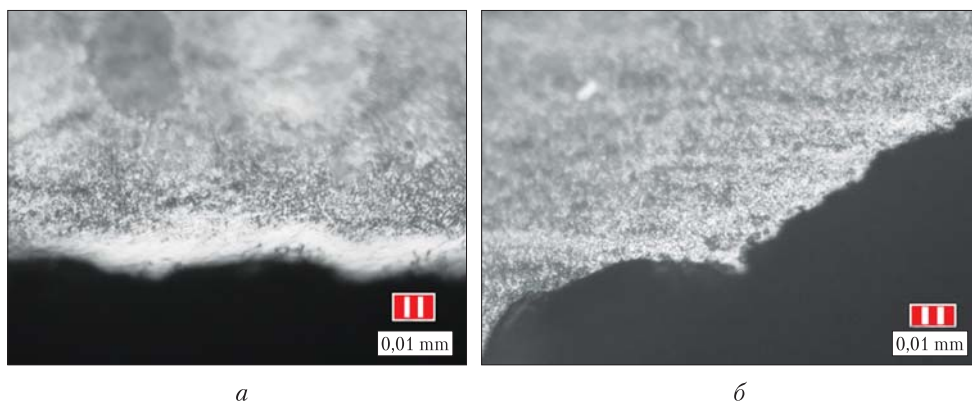


Рис. 8. Мікроструктура різних перерізів лопатки ГТД з експериментального сплаву та міждендритні параметри (мм): *a* – конус (0,33–0,60); *б* – перо (0,28–0,46); *в* – замок (0,28–0,53)

Рис. 9. Мікроструктура експериментального сплаву поблизу міжфазної границі з вогнетривом: *a* – корундова форма; *б* – корундова форма, модифікована алюмінієм, $\times 1000$



но залежність фізико-механічних властивостей кераміки на основі корунду від кількості модифікатора. За результатами досліджень встановлено, що саме за температури 1300 °С у вогнетривкій композиції утворюється муліт, що приводить до підвищення міцності кераміки.

Отримані дані засвідчили, що використання нового, запропонованого нами складу ливарної форми дозволяє зменшити товщину змінного шару вилівка з 30–35 мкм (у разі заливання в корундову форму) до 5–15 мкм (у разі заливання у форму з модифікованої кераміки) (рис. 9).

Застосування модифікованої кераміки для ливарних форм дало також змогу скоротити кількість браку деталей, збільшити вихід придатного литва та підвищити коефіцієнт використання металу.

Для виготовлення керамічних тиглів вперше запропоновано вогнетривкі суміші на основі плавленого магнезиту, модифіковані алюмінієм і кремнієм. Показано, що дисперсні порошки алюмінію та кремнію під час розплавлення перетворюють процес спікання суміші з твердофазного на процес, який відбувається з утворенням рідкої фази. Завдяки цьому збільшується площа контакту між зернами та зменшується пористість у кераміці. Після термічної обробки міцність тиглів під час стискання зростає на 10–12 %, а температура початку їх деформації під навантаженням збільшується приблизно на 50 °С.

Також було вдосконалено хімічний склад керамічних стрижнів. За допомогою проведеного теоретичного аналізу та комплексу експериментальних досліджень визначено опти-



а



б

Рис. 10. Воскові моделі (а) і блок лопаток (б), одержаний за новою технологією

мальну кількість модифікаторів у стрижневих сумішах. Так, для одержання охолоджуваних лопаток ГТД рекомендовано використовувати суміш на основі корунду, модифіковану Al (0,5–3,0 %) + Si (0,5–3,0 %). Випробування показали, що використання цього матеріалу дозволяє зменшити кількість браку литих лопаток, пов'язаного з полумками стрижнів, завдяки підвищенню їх термостійкості та міцності.

Одним з ефективних і важливих способів підвищення якості литих виробів є фільтрація розплаву, який перед заливанням у форми (кристалізатори) пропускають через керамічні фільтри. Аналіз впливу способу фільтрації на механічні характеристики сплаву засвідчив, що найбільш ефективним є застосування піно-керамічних фільтрів.

Запропоновано метод очищення металу від механічних домішок із застосуванням живильників так званого дощового типу, виготовлених з пінокерамічного фільтра. Цей метод виявився особливо ефективним для лиття робочих охолоджуваних лопаток турбіни (рис. 10).

У разі використання дощового способу надходження розплаву у форму виключається ймовірність пошкодження керамічного стрижня в лопатках під дією термічного удару завдяки поділу струменя металу на розосереджені потоки. Крім того, це забезпечує рівномірний розподіл температури по перетину

вилітків, що в результаті сприяє підвищенню їх якості.

Отже, дослідження, проведені у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України, дозволили отримати низку важливих практичних результатів:

- розроблено хімічний склад перспективного для промисловості жароміцного корозійностійкого сплаву на основі нікелю, який доцільно використовувати у виробництві литих робочих лопаток ГТД енергетичного та суднового призначення;
- запропоновано пристрій для додаткового охолодження ливарних форм інертним газом у вакуумно-індукційному агрегаті, призначений для одержання деталей зі спрямованою структурою;
- розроблено технології одержання ливарних форм і стрижнів із модифікованої кераміки. Застосування у виробництві нових технологій та запропонованих вогнетривких матеріалів допомогло зменшити кількість браку лопаток, пов'язаного з якістю поверхні;
- проведено випробування фільтрів з модифікованої кераміки. Застосування таких фільтрів під час заливання розплаву у форми дало змогу підвищити якість лопаток та істотно зменшити кількість їх браку через неметалеві включення. Інструкцію з виготовлення керамічних фільтрів за новою технологією передано на виробництво;

- підготовлено низку нормативних документів для підприємств газотурбобудівної галузі України.

Надалі ми плануємо зосередитися на таких напрямках досліджень:

- продовження робіт зі створення нових хімічних складів жароміцних нікелевих сплавів, призначених для виготовлення деталей ГТД;
- розроблення нових складів керамічної маси на основі водного в'язучого (римасол, людокс) з метою поліпшення екологічних

умов праці робітників, задіяних у виготовленні керамічних оболонкових форм;

- використання адитивних технологій для 3D-друку моделей із застосуванням сучасних полімерних матеріалів, що дозволить скоротити часові й фінансові витрати на виготовлення пресформ для разових воскових моделей. 3D-друк є також дуже актуальною технологією для ремонту складнопрофільних деталей газотурбінних двигунів.

Iuliia G. Kvasnytska

Phisico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>

IMPROVEMENT OF MATERIALS AND TECHNOLOGIES TO INCREASE THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF CAST BLADES FOR GAS TURBINE ENGINES

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, July 3, 2024

The report presents the results of fundamental and applied research conducted at the Phisico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine to produce complex parts for new generation gas turbine engines. The scientific and technological foundations of the processes of producing new heat-resistant corrosion-resistant alloys with improved characteristics were developed. The regularities of the influence of alloying elements on the phase-structural stability of alloys were established. New compositions of refractory materials for crucibles, ceramic molds, rods, and filters were created.

Keywords: heat-resistant alloy, gas turbine engine, turbine blade, corrosion, vacuum induction melting, directional crystallization of castings, cooling rate, ceramic crucibles.

Cite this article: Kvasnytska Iu.G. Improvement of materials and technologies to increase the operational characteristics of cast blades for gas turbine engines. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (9): 23–31. <https://doi.org/10.15407/visn2024.09.023>