

MATERIALS IN EXTREMAL CONDITIONS

PACS numbers: 61.72.Dd, 81.05.Bx, 81.10.-h, 81.20.Vj

Зварювання монокристалів жароміцних нікелевих стопів як інновації енергетичних газових турбін

К. А. Ющенко, Б. О. Задерій, І. С. Гах, Г. В. Звягінцева,
О. О. Фомакін, А. В. Завдовєєв

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

Роботу пов'язано із всезростаючим використанням газових турбін у складі енергетичного обладнання електростанцій, газоперекачувальних агрегатів, силових корабельних двигунів та необхідністю підвищення їхньої потужності, функціональних параметрів, збільшення термічної та експлуатаційної ефективності, екологічності. Вирішення таких запитів у технічному плані пов'язують з підвищенням температури робочого тіла (газу) на вході до турбіни за рахунок розробки та впровадження нових схем, конструкцій, технологій та матеріалів, зокрема з використанням і вдосконаленням високолегованих жароміцних нікелевих стопів з монокристалічною структурою та із застосуванням зварювання. Метою роботи являється розвиток нових підходів стосовно виробництва монокристалічних зварних конструкцій відповідального призначення з підвищеними механічними характеристиками і експлуатаційними параметрами. Наведено результати досліджень структури, механічних властивостей з'єднань і приклади зварних конструкцій макетних зразків газових турбін типу «складена лопатка» та «блінг». Наголошується на доцільності подальшого розвитку запропонованих технологій спільно з розробниками, виробниками та експлуатаційниками газових турбін у плані конструкторської, технологічної доробки та промислового освоєння.

Corresponding author: Hanna Vitaliyivna Zviagintseva
E-mail: zvanna@paton.kiev.ua, azvyagintseva@ukr.net

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: K. A. Yushchenko, B. A. Zadery, I. S. Gakh, A. V. Zviagintseva, O. O. Fomakin, and A. V. Zavdoveev, Welding of Single Crystals of Heat-Resistant Nickel Alloys as Innovations of Power Gas Turbines, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 10: 1401–1415 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.10.1401](https://doi.org/10.15407/mfint.43.10.1401).

Ключові слова: жароміцні нікелеві стопи, монокристали, зварні конструкції складної геометрії, електронно-променеве зварювання, суцільно-зварні складені лопатки, газові турбіни, моноколесо «блінг», умови формування монокристалічної структури, дифракція електронного зворотного розсіювання.

The work is associated with the increasing use of gas turbines as part of equipment of power plants, gas pumping units, power ship engines and the need to increase their power, functional parameters, increase thermal and operational efficiency, and environmental friendliness. The solution of such requests in technical terms is associated with an increase in the temperature of the working fluid (gas) at the inlet to the turbine for the set of development and implementation of new schemes, structures, technologies and materials, in particular, with the use and improvement of high-alloy heat-resistant nickel alloys with a monocrystalline structure and using welding. The aim of the work is to develop new approaches to the production of single-crystal welded structures for critical purposes with increased mechanical characteristics and operational parameters. The results of studies of the structure, mechanical characteristics of joints and examples of welded structures of prototypes of gas turbines of the 'composite blade' and 'bling' type are presented. The expediency of further development of the proposed technologies together with developers, manufacturers and operators of gas turbines in terms of design, technological refinement and industrial development is noted.

Key words: heat-resistant nickel alloys, single crystals, welded structures of complex geometry, electron beam welding, all-welded folded blades, gas turbines monowheel 'bling', conditions for the formation of a single crystal structure, electron backscattering diffraction.

(Отримано 22 липня 2021 р.)

1. ВСТУП

У світовій практиці спостерігається зростаюча тенденція використання авіаційних технологій виробництва в енергетичній галузі. Створено нове покоління енергетичних комплексів з використанням газотурбінних установок (ГТУ), в яких виробництво тепла і електроенергії здійснюють з ККД більше за 60% [1, 2]. Відмінною особливістю ГТУ нового покоління є більш висока температура газу перед турбіною (до 1600°C), що дозволяє підвищити: ресурс роботи до 160 тис. год., експлуатаційну надійність, а також знизити емісію шкідливих викидів в навколишнє середовище і зменшити вартість електроенергії на 10%. Створення нових поколінь ГТУ стало можливим завдяки розробці нових матеріалів і технологій — застосування як конструкційні матеріали високолеговані жароміцні нікелеві стопи (ЖНС) з монокристалічною структурою, принципово нові конструкційні та технологічні рішення, зокрема з використан-

ням зварювання [3].

Найбільш широке застосування ЖНС знаходять для виготовлення елементів гарячого тракту газотурбінних двигунів (ГТД) та ГТУ — робочих і соплових лопаток турбін, стулок поворотних сопел та ін. Особливо відповідальними і термонавантаженими з них є робочі лопатки турбіни високого тиску (ТВТ). Використання ЖНС з монокристалічною структурою для їх виготовлення дозволяє значно підвищити здатність витримати весь комплекс експлуатаційних навантажень, їхню працездатність і надійність [4, 5].

Незважаючи на успіхи технології вирощування монокристалів ([6] та ін.), виготовлення таких виробів є не зовсім простою технічною та економічною задачею. Особливо гостро постають проблеми виготовлення деталей гарячого тракту двигуна таких, як охолоджувальні монокристалічні лопатки зі складною системою внутрішніх каналів, довгомірних лопаток ГТУ, а також моноколів ТВТ і ТНТ (турбіна низького тиску).

Для оптимізації системи охолодження робочих лопаток ТВТ авіаційних ГТД вже були запропоновані нові технологічні та конструктивні підходи по типу «складена лопатка» із застосуванням лютування [7]. Але ідея не впроваджена у промисловість внаслідок низьких механічних характеристик з'єднань. З часом її реалізували для виготовлення довгомірних монокристалічних лопаток ГТУ. Компанія Siemens для одержання лопаток ТВТ ГТУ своєї нової турбіни створила на базі технології рідкофазного дифузійного з'єднання (розробник Pratt & Whitney, 1970 р.) технологію виготовлення інтегрованих довгомірних робочих лопаток з монокристалічною структурою зі стопу CMSX-4. Застосування зварювання дозволило оптимізувати систему охолодження та підвищити робочу температуру лопатки і значно знизити відсоток браку в порівнянні з традиційною технологією. Однак, слід зазначити деякі недоліки одержаних дифузійним зварюванням з'єднань ЖНС: невисокі як для авіаційних ГТД значення механічних властивостей ($0,5-0,6\sigma_b$), складність технологічного процесу та контролю якості.

Однією з головних задач для проектування роторів ГТД є поєднання мінімальної маси конструкції з максимальним ресурсом та надійністю. Традиційні конструкції роторів, що застосовують механічне з'єднання лопатки з диском, на сучасному етапі практично вичерпали свій ресурс в області зниження маси та підвищення працездатності. Конструкція робочих моноколів типу «бліск», «блінг» вирішує задачу маси і ресурсу [8]. Ефект за цих обставин досягають за рахунок виключення із конструкції найвразливішого і металоємного механічного (замкового) з'єднання лопатки з диском. Тобто лопатка і диск являє собою єдине ціле. У результаті (за даними компанії Snecma Moteurs) досягають зниження $\sim 25\%$ (тип «бліск») та $\sim 50\%$ («блінг») маси, зменшення діаметру турбіни, підвищення робочих

параметрів двигуна, значне зменшення трудо- та металовитрат [9–11]. Створення таких конструкцій досягають різними способами, починаючи від фрезерування із монолітної поковки до залучення різних методів і схем зварювання [12–15]. Всі вони мають свої переваги та недоліки. Останнім часом для вирішення цієї проблеми все більше згадують про застосування зварювання тертям [12, 13].

Так, корпорація IHI Corporation (Mitsubishi Group) для прототипу турбореактивного двоконтурного ГТД 5-го покоління XF9-1 виготовила суцільнозварне моноколесо турбіни типу «бліск» із застосуванням лінійного зварювання тертям (ЛЗТ). Робочі лопатки із монокристалічного ЖНС приварюють до диску із полікристалічного нікель-кобальтового стопу [11]. Зварна конструкція елементів ротору ТВТ і ТНТ дозволила значно знизити (на ~25%) вагові характеристики турбіни і підвищити ефективність охолодження робочих лопаток, збільшити температуру газу перед турбіною до 1800°C та збільшити ККД в цілому. Технічні аспекти технології зварювання як і механічні характеристики з'єднань на даний час не розголошують, але, як відомо, метод ЛЗТ потребує коштовного спеціалізованого оснащення, яке відсутнє на вітчизняних підприємствах енергетичної та авіакосмічної галузі. Окрім того, метод ЛЗТ характеризується складністю підготовки заготовок до зварювання, технологічними труднощами одержання якісного з'єднання (ґрат, несцільності, розтріскування) та контролю якості, зниженням механічних властивостей та ін. [16]. Видається більш раціональним виготовлення вузлів, деталей, конструкцій подібного роду шляхом їх зварювання методами топлення з окремих елементів, що дозволяє створювати вироби з монокристалічною структурою з більш високими функціональними параметрами. Підвищення механічних та експлуатаційних характеристик ЖНС за рахунок складного легування та формування монокристалічної структури своєю чергою призводить до зниження технологічності і зокрема — зварюваності [17, 18]. Донині обмежені теоретичні (фізичні умови формування і збереження монокристалічної структури), практичні (технологія, конструкція) рекомендації щодо створення саме такого типу зварних конструкцій. Тому актуальним залишається питання розробки технології виготовлення конструкцій складної геометрії з ЖНС з монокристалічною структурою типу «складена лопатка» та «блінг» з використанням способів зварювання топленням, як найбільш технологічного та розповсюдженого в авіакосмічній та енергетичній галузях промисловості.

2. ЕКСПЕРИМЕНТ

Експерименти зі зварювання та дослідження проводили на зразках промислового стопу ЖС26ВИ, який використовують для створення

робочих лопаток зі спрямованою та монокристалічною структурою, виготовлений на ДП «Мотор-Січ». Хемічний склад стопу наведено в табл. 1.

Досліджували стикові та торцеві зварні з'єднання зі зразків розміром $50 \times 25 \times (2-5)$ мм, товщиною близькою до розмірів реальних вузлів ГТД.

Як показує досвід зі зварювання ЖНС [19], зважаючи на високу питому потужність, прецизійність, мобільність джерела нагріву, можливість керування у широкому діапазоні тепловкладенням та технологічність, для виконання подібних операцій більш всього підходить метод електронно-променевого зварювання (ЕПЗ). Для формування з'єднання у вакуумі забезпечують надійний захист металу шва від окислення, забруднень домішками, які викликають зміну хемічного складу, структурної і фізичної однорідності та погіршення основних властивостей ЖНС. Окрім того, обладнання для ЕПЗ виготовляють і застосовують на підприємствах України.

Зразки для експериментів та досліджень вирізали із заготовок електроіскровим способом з подальшим шліфуванням. Шліфи для металографічних досліджень готували на шліфувально-полірувальному верстаті Abramin фірми Strues. Механічні характеристики зварних з'єднань визначали шляхом випробування нестандартних плоских зразків на розрив вирізаних у поперечному до осі шва напрямку. Переріз робочої частини зразка складав $\sim 5 \text{ мм}^2$, довжина 28 мм. Випробування проводили в інтервалі температур від кімнатної до 1100°C , зважаючи на те, що робоча температура стопу ЖС26 складає 1050°C . Оцінку короткочасної міцності проводили на установці MTS 810 за швидкості навантаження $0,02 \text{ мм/с}$, довготривалої міцності — на машині МП-3Г.

Основна вимога до зварного з'єднання полягає у збереженні монокристалічної структури. Руйнування монокристалічної структури матеріалу з'єднання проявляється в утворенні зерен випадкової орієнтації (ЗВО), тобто формуванні полікристалічної структури в металі шва і появі тріщин. Наявність зерен випадкової орієнтації фіксують картами орієнтувань методу electron backscattering diffraction (EBSD) аналізу (рис. 1, а) з переважним вмістом висококутових границь зерен (рис. 1, в) та полюсними фігурами $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ (рис. 1, б).

ТАБЛИЦЯ 1. Номінальний хемічний склад ЖС26ВИ, % ваг.

TABLE 1. Nominal chemical composition of ЖС26ВИ, % wt.

C	Cr	Co	W	Mo	Ti	Al	Nb	V	Fe	Si	Mn	B
0,13– 0,18	4,3– 5,3	8,0– 10	10,9– 12,5	0,8– 1,4	0,8– 1,2	5,5– 6,2	1,4– 1,8	0,8– 1,2	$\leq 1,0$	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$	0,015

Дослідження та аналіз особливостей кристалографічної структури зварних з'єднань залежно від технологічних умов формування шва проводили з використанням методів EBSD аналізу, рентгенівської дифрактометрії та оптичної металографії. Основними критеріями оцінки якості зварних з'єднань були: орієнтаційна однорідність шва і зони термічного впливу з основним металом; відсутність тріщин і дефектів формування шва; кількість структурних складових та їхній рівень відхилення від вихідної кристалографічної орієнтації; рівень механічних властивостей.

Вихідні кристалографічні параметри зварного з'єднання задавали орієнтуванням за допомогою рентгенівського методу. Про кри-

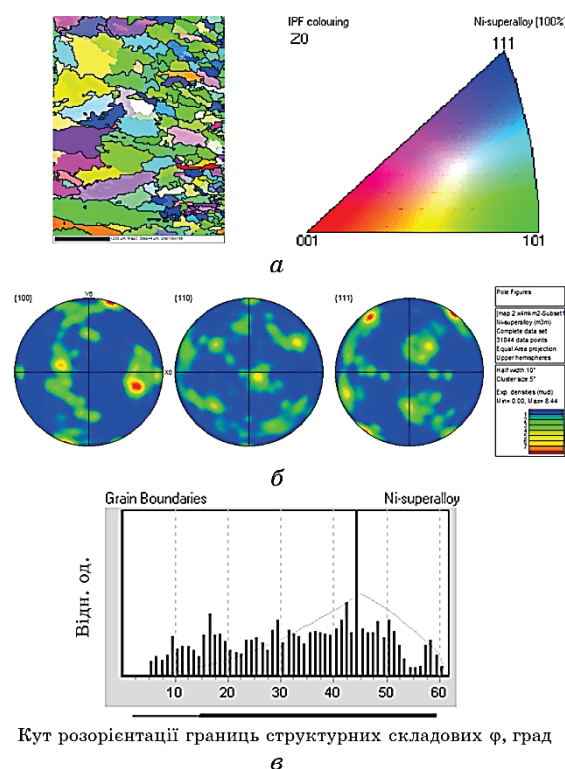


Рис. 1. Карта орієнтування структурних складових (а), полюсні фігури {100}, {110}, {111} (б) та частотна діаграма по куту розорієнтації (φ) границь структурних складових (в) металу шва зварного з'єднання стопу ЖС26ВИ, одержаного за традиційною технологією ЕПЗ нікелевих стопів.

Fig. 1. Orientation map of structural components (а), pole figures {100}, {110}, {111} (б) and frequency diagram on the angle of disorientation (φ) of the boundaries of structural components (в) of the weld metal of the welded joint of alloy ЖС26ВИ nickel alloy EBW technologies.

талографічну орієнтацію металу шва, наявність, кількість та рівень відхилення ЗВО судили, виходячи з аналізу полюсних фігур, карт орієнтування структурних складових та частотних діаграм кутів розорієнтації границь.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження, виконані у разі зварювання зразків монокристалів ЖНС показали, що формування монокристалічної структури зварних швів забезпечується за обмежень відхилення напрямку максимального температурного градієнта (G) від кристалографічної орієнтації переважного росту (100) та забезпечення високих значень співвідношення максимального температурного градієнта до швидкості спрямованої кристалізації (G/R) [20, 21].

У технологічному плані реалізацію таких умов досягають шляхом керування тепловкладенням та теплорозподілом за рахунок основних параметрів ЕПЗ та вибору конструкції зварного з'єднання в частині кристалографічної орієнтації, типу, товщини. Рисунки 1 та 2 ілюструють результати такого підходу. Позитивний вплив проявляється в обмеженні утворення ЗВО та зміни кристалографічної орієнтації металу шва (рис. 2) за оптимізації термічних і орієнтаційних умов кристалізації. У результаті досягають кращих показників структури ЖНС. У металі шва зберігається кристалографічна орієнтація вихідного монокристала.

На полюсній фігурі (рис. 2, б) $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ металу шва спостерігаються тільки ті відображення, які відповідають монокристалічній структурі матеріалу, водночас формується багаторівнева кристалографічна орієнтаційна структура зі структурних елементів з переважним формуванням малокутових відхилень (рис. 2, в). Наявність останніх у структурі металу шва може бути пояснено

ТАБЛИЦЯ 2. Короткочасні механічні властивості зварних з'єднань монокристала стопу ЖС26ВІ у разі випробувань на розтяг.

TABLE 2. Short-term mechanical properties of welded joints of single crystal alloy ЖС26ВІ at tensile tests.

$T_{\text{вип}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\psi, \%$
20	737	684	13,4
600	858,7	770	24,5
800	981	824	3,6
900	782	778	6,5
1000	563	547	1,2
1050	438	400	1,8
1100	389	336	2,2

стохастичністю взаємодії електронного променя з матеріалом розтопу та нерівноважністю процесів для формування з'єднань.

Істотне обмеження утворення висококутових границь зерен забезпечує підвищення тріщиностійкості з'єднання і високий рівень механічних властивостей зварних з'єднань (табл. 2, 3). У діапазоні температур 20–1100°C, у разі випробувань на розтяг короточасні механічні властивості зварних з'єднань зберігаються на рівні вихідного монокристала (табл. 2), а довготривала міцність досягає 0,75–0,8 σ

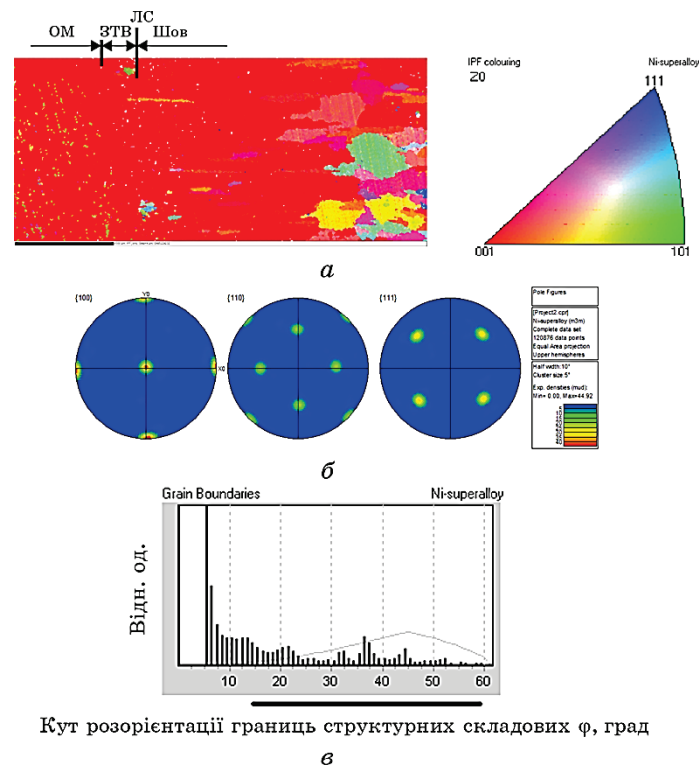


Рис. 2. Карта орієнтування структурних складових (а), полюсні фігури {100}, {110}, {111} (б) та частотна діаграма по куту розорієнтації (ϕ) границь структурних складових (в) металу зварного з'єднання стопу ЖС26ВИ, одержаного для керування фізичними параметрами кристалізації технологічними чинниками ЕПЗ: ОМ — основний метал, ЗТВ — зона термічного впливу, ЛС — лінія стоплення.

Fig. 2. Orientation map of structural components (a), pole figures {100}, {110}, {111} (b) and frequency diagram on the angle of disorientation (ϕ) of the boundaries of the structural components (c) of the welded metal of the alloy ЖС26ВИ obtained by controlling physical crystallization parameters by technological factors of the EDW: OM is the base metal, ЗТВ is the zone of thermal influence, ЛС is the fusion line.

(табл. 3).

Для реалізації результатів досліджень, спроектовано і виготовлено складально-зварювальне обладнання, відпрацьована технологія зварювання на макетних зразках перспективних монокристалічних вузлів гарячого тракту ГТД і ГТУ, таких як «складена» робоча лопатка та елемент моноколеса по типу «блінг».

На рисунку 3 представлено варіант конструкції складеної охолоджувальної лопатки зі стопу ЖС26ВИ, одержаної з використанням ЕПЗ. Однорідна спрямованість дендритів на макро- та мікроструктурі торцевого з'єднання спинки та корита охолоджувальної робочої лопатки (рис. 4) може свідчити про збереження вихідної орієн-

ТАБЛИЦЯ 3. Довготривалі механічні властивості зварних з'єднань монокристала стопу ЖС26ВИ за температури 900°C.

TABLE 3. Long-term mechanical properties of welded joints of single crystal alloy ЖС26ВИ at a temperature of 900°C.

Зразок	σ_{10} , МПа	σ_{50} , МПа	σ_{100} , МПа
Зварне з'єднання	360	300	250
Основний метал	475	360	330

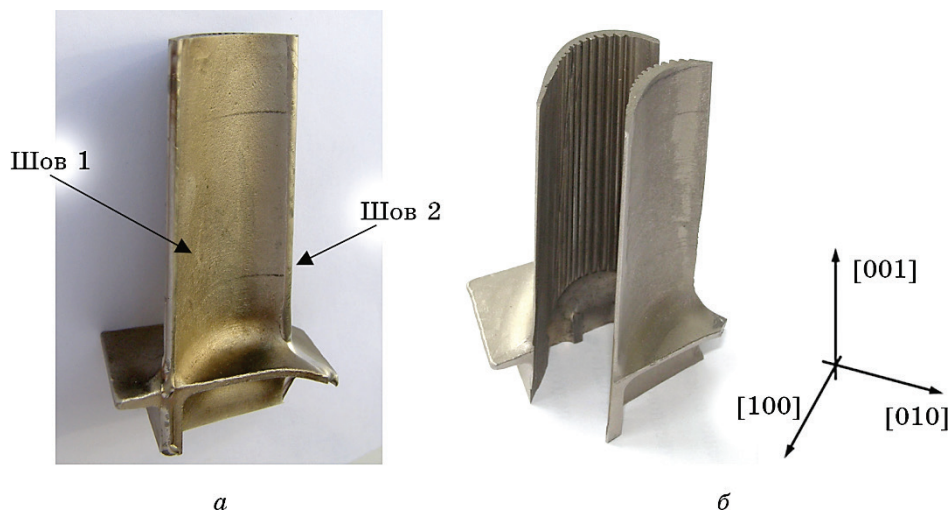


Рис. 3. Макет суцільнозварної монокристалічної охолоджувальної робочої лопатки (а) зі стопу ЖС26ВИ, одержаної шляхом ЕПЗ заготовок (б) з типовою кристалографічною будовою.

Fig. 3. Model of an all-welded single-crystal cooling working blade (a), made of ЖС26ВИ alloy, obtained by RBW billet (b) with a typical crystallographic structure.

тації монокристалічних заготовок.

Роздільне виготовлення спинки та корита лопатки, окрім спрощення технології виробництва за менших витрат, дозволяє потенційно одержати оптимальну інноваційну геометрію внутрішніх каналів, що забезпечить максимальний коефіцієнт внутрішнього охолодження та можливість підвищення робочої температури на вході турбіни. Значно спрощується також виготовлення довговимірних робочих лопаток енергетичних ГТУ.

Встановлені фізичні основи формування монокристалічної структури шва і технологічні шляхи їх забезпечення, дозволяють застосовувати ЕПЗ для створення перспективного суцільнозварного моноколеса газової турбіни по типу «блінг» (рис. 5) із монокристалічних елементів.

«Блінг» — це робоче кільце, в якому лопатки виконані з диском (кільцем) за одне ціле, що дозволяє знизити на $\sim 50\%$ вагові характеристики ротора турбіни порівняно з традиційною конструкцією, окрім того підвищити ресурс та термодинамічну ефективність дви-

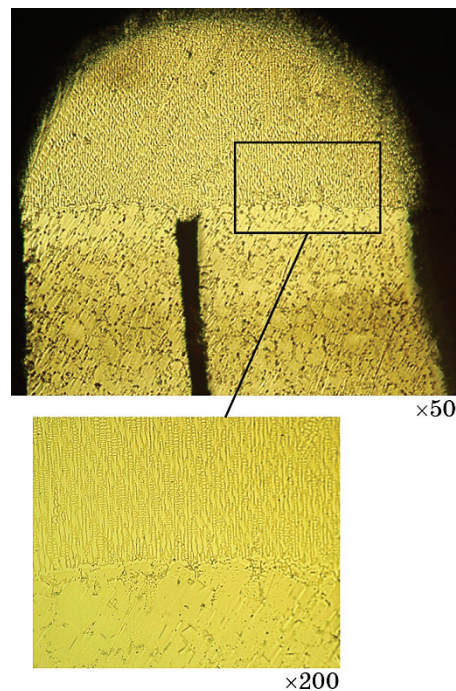


Рис. 4. Макро- та мікроструктура зварного з'єднання спинки та корита охолоджувальної робочої лопатки зі стопу ЖС26ВІ.

Fig. 4. Macro- and microstructure of the welded joint of the back and trough of the cooling working blade made of ЖС26ВІ alloy.

гуна в цілому.

Роботу зі створення макету (рис. 6) виконували з використанням спеціально спроектованих та виготовлених окремих елементів макетного зразка. Вказані елементи являли собою робочу лопатку із стопу ЖС26, аксіальна і азимутальна орієнтація яких вибрана за умови забезпечення в області з'єднання фізичних умов формування монокристалічного шва (рис. 5, б). Поверхня стоплення та напрям зварювання не перевищував кут відхилення 5° від кристалографічної орієнтації (100). Лопатка в місці зварювання мала змінну товщину 2–5 мм. Складання під зварювання виконували з використанням спеціалізованого оснащення, яке забезпечувало фіксацію та позиціонування з'єднання відносно зварювального променя та його вхід і вихід на технологічні планки. Режим зварювання вибирали виходячи із необхідності забезпечення формування швів з наскрізним проваром, поверхнями стоплення, близькими до паралельних та геометрією, яка не змінювалась би як по довжині стику, так і по товщині. Як показали дослідження, виконані [20, 21], саме за таких умов вибору режиму ЕПЗ (табл. 4) забезпечується: стабільне якісне формування швів оптимальної геометрії, температурно-

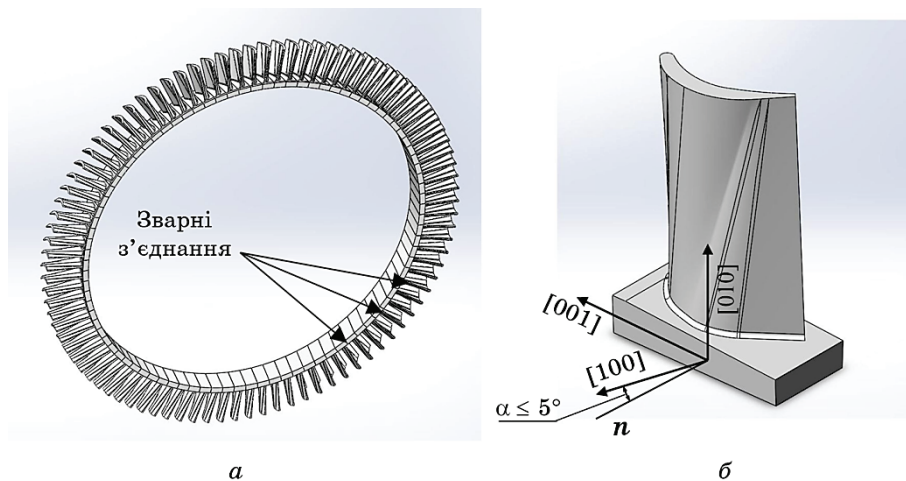


Рис. 5. Схематичне подання конструкції суцільнозварного моноколеса типу «блінг» (а), елемент макету з позначенням кристалографічної орієнтації в місці з'єднання (б): n — нормаль до поверхні стику з'єднання, α — допустимий кут відхилення кристалографічної орієнтації на кромці стику зварного з'єднання.

Fig. 5. Schematic representation of the design of an all-welded monocycle type 'bling' (a), a model element with the designation of the crystallographic orientation at the joint (b): n is the normal to the joint surface, α is the allowable angle of deviation of the crystallographic orientation at the edge of the weld joint.

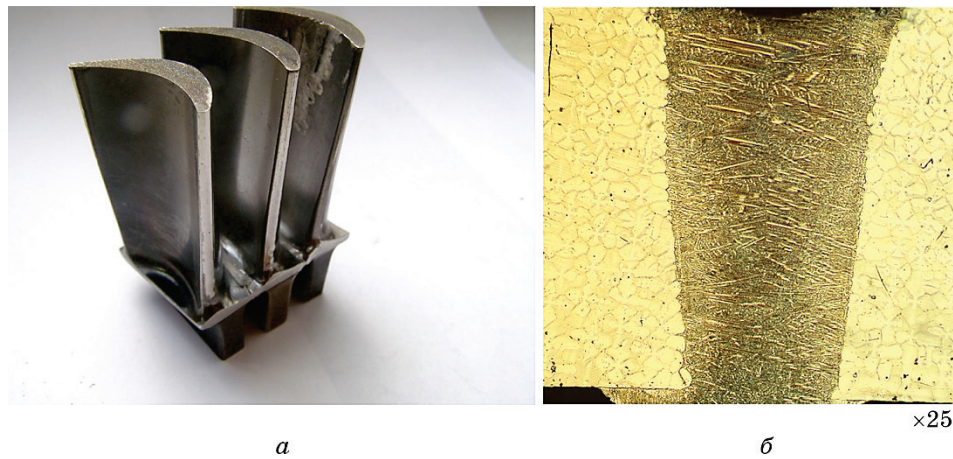


Рис. 6. Зварний сектор (а) та макроструктура з'єднання (б) секції макетного зразка суцільнозварного моноколеса турбіни типу «блінг».

Fig. 6. Welded sector (a) and macrostructure of the connection (b) of the section of the mock-up of the all-welded turbine of the 'bling' type turbine.

часові параметри спрямованої кристалізації, обмеження формування зерен випадкової орієнтації та відсутність тріщин, мінімізація зварних напружень та деформацій.

Наведені результати досліджень структури та механічних властивостей зварних з'єднань, монокристалів ЖНС, а також досвід, одержаний для створення макетів елементів зварних роторних конструкцій газових турбін, показують шляхи та можливості формування зварних з'єднань складної геометрії із забезпеченням ви-

ТАБЛИЦЯ 4. Параметри режиму ЕПЗ ЖС26ВИ товщиною (2–5) мм: $I_{\text{ном}}$ — значення струму променя, за якого настає наскрізне протоплення, $I_{\text{ф.0}}$ — значення струму фокусувальної лінзи за нульового значення $I_{\text{пр}}$ та положення фокусу променя на поверхні зразка, A — амплітуда сканування променя у поперечному напрямі відносно осі шва, f — частота сканування променя у поперечному напрямі відносно осі шва.

TABLE 4. Parameters of the mode EBW ЖС26ВИ thickness (2–5) mm: $I_{\text{ном}}$ is the value of the beam current at through penetration, $I_{\text{ф.0}}$ is the value of the current of the focusing lens at zero value $I_{\text{пр}}$ and the position of the focus of the beam on the surface of the sample, A is the amplitude of the beam scanning in the transverse direction relative to the axis of the seam, f is the time-total scanning of the beam in the transverse direction relative to the axis of the seam.

U , кВ	$I_{\text{пр}}$, МА	$I_{\text{ф.р}}$, МА	$\nu_{\text{св}}$, М/Г	A , мм	f , Гц
24	$(1,5-1,7)I_{\text{ном}}$	$(20-25)I_{\text{ф.0}}$	60	0,9	30

сокого ступеню досконалості монокристалічної структури та механічних характеристик. Запропоновані рішення говорять про перспективність застосування монокристалічних зварних конструкцій для створення об'єктів відповідного призначення, необхідність подальшого розвитку та освоєння технологічних рішень спільно з розробниками і виробниками газових турбін.

4. ВИСНОВКИ

1. У світовій практиці спостерігається тенденція використання авіаційних технологій виробництва в енергетичній галузі. Створено нове покоління енергетичних комплексів з використанням газотурбінних установок, в яких виробництво тепла і електроенергії здійснюють з ККД більшим за 60%.
2. Вирішальною особливістю ГТУ нового покоління є більш висока температура газу перед турбіною (до 1600°C), що дозволяє підвищити: ресурс роботи до 160 тис. год., ККД, експлуатаційну надійність, а також знизити емісію шкідливих викидів у навколишнє середовище і зменшити вартість електроенергії на 10 %.
3. Створення нових поколінь ГТУ стало можливим завдяки розробці нових матеріалів і технологій — застосування як конструкційних матеріалів високолегованих ЖНС з монокристалічною структурою, принципово нових конструкційних і технологічних рішень, зокрема з використанням зварювання.
4. Виконаний аналіз тенденцій конструювання і технологічних рішень для створення перспективних поколінь ГТД і ГТУ, а також результатів робіт з вивчення зварюваності промислових ЖНС з монокристалічною структурою, вказує на зростаючу роль та перспективність зварювання для виробництва енергетичного устаткування.
5. Розроблені теоретичні та технологічні основи керування формуванням структури металу шва у разі ЕПЗ монокристалів, шляхом оптимізації температурно-часових параметрів і кристалографічно-орієнтаційних умов процесу зварювання, які дозволили перейти до створення технології виготовлення реальних конструкцій.
6. На основі виконаних технологічних розробок запропоновано конструкцію, відпрацьовані режими зварювання на макетних зразках перспективних вузлів із монокристалів ЖНС гарячого тракту ГТД і ГТУ таких, як складена робоча лопатка та елемент монокоlesa по типу «блінг».

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. В. Логунов, М. Н. Буров, Д. В. Данилов, *Двигатель*, № 1: 10 (2016).
2. K. Tsukagoshi, A. Muiyama, J. Masada, Y. Iwasaki, and E. Ito, *Mitsubishi*

- Heavy Industries, Ltd. Technical Review*, **44**, No. 4: 1 (2007).
3. L. S. Langston, *Global Gas Turbine News*, No. 9: 76 (2014).
4. T. Hino, T. Kobayashi, Y. Koizumi, H. Harada, and T. Yamagata, *Superalloys* (Eds. T. M. Pollock, R. D. Kissinger, R. R. Bowman, K. A. Green, M. McLean, S. Olson, and J. J. Schirm) (TMS: 2000), p. 729.
5. Y. Koizumi, T. Kobayashi, T. Yokokawa, T. Kimura, M. Osawa, and H. Harada, *Cost Conf. Liege* (1998), part 2: 1089.
6. Е. Н. Каблов, В. Н. Толорайя, Н. Г. Орехов, И. М. Демонис, *Авиационные материалы и технологии*, № 1: 118 (2004).
7. С. З. Копелев, М. Н. Галкин, А. А. Харин, И. В. Шевченко, *Тепловые и гидравлические характеристики охлаждаемых лопаток газовых турбин* (Москва: Машиностроение: 1993).
8. А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий, *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок* (Москва: Машиностроение: 2008), т. 2.
9. H. Matsuzaki, Y. Suto, Y. Kanazawa, M. Sato, I. Kobayashi, and Y. Kobayashi, *Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, 4: V004T10A018.
10. R. L. Altman, *Gas Turbine Technology Benefits for Commercial Airplane Operator* (Pratt and Whitney, United Technologies: 1991).
11. *XF9-1, the World's Best Standards Fighter Engine, Has Been Completed — Japan's Military Technology, Interview with the Developer, BLOGOS*, Part 1/2 (2019) (in Japanese).
12. Е. О. Фомичев, Н. Н. Воронин, *Двигатель*, № 5: 18 (2013).
13. А. Супов, С. Х. Даутов, В. Г. Ковальчук, О. Г. Оспенникова, В. И. Лукин, М. Л. Саморуков, *Наукоемкие технологии в машиностроении*, № 3: 28 (2016).
14. А. В. Люшинский, *Сварочное производство*, **30**, № 7: 17 (2016).
15. E. V. Galieva, V. A. Valitov, R. Ya. Lutfullin, S. Dmitriev, A. Akhunova, and M. Mukhametrakhimov, *Materials Science Forum*, **838–839**: 350 (2016).
16. В. М. Бычков, А. С. Селиванов, А. Ю. Медведев, В. А. Супов, Б. О. Большаков, Р. Р. Гринь, Ф. Ф. Мусин, *Вестник УГАТУ*, **16**, № 7: 112 (2012).
17. В. П. Морочко, Л. И. Сорокин, Н. Ю. Зыбко, *Автоматическая сварка*, № 12: 42 (1980).
18. Л. И. Сорокин, *Сварочное производство*, № 7: 11 (2003).
19. C. Wiednig, C. Lochbichlerb, N. Enzinger, C. Beala, and C. Sommitsch, *Proc. Engineering*, No. 86: 184 (2014).
20. К. А. Ющенко, Б. А. Задерий, И. С. Гах, О. П. Карасевская, *Автоматическая сварка*, № 8: 21 (2016).
21. К. А. Ющенко, И. С. Гах, Б. А. Задерий, А. В. Звягинцева, О. П. Карасевская, *Автоматическая сварка*, № 5: 46 (2013).

REFERENCES

1. A. V. Logunov, M. N. Burov, and D. V. Danilov, *Dvigatel'*, No. 1: 10 (2016) (in Russian).
2. K. Tsukagoshi, A. Muiyama, J. Masada, Y. Iwasaki, and E. Ito, *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review*, **44**, No. 4: 1 (2007).
3. L. S. Langston, *Global Gas Turbine News*, No. 9: 76 (2014).
4. T. Hino, T. Kobayashi, Y. Koizumi, H. Harada, and T. Yamagata, *Superalloys*

- (Eds. T. M. Pollock, R. D. Kissinger, R. R. Bowman, K. A. Green, M. McLean, S. Olson, and J. J. Schirm) (TMS: 2000), p. 729.
5. Y. Koizumi, T. Kobayashi, T. Yokokawa, T. Kimura, M. Osawa, and H. Harada, *Cost Conf. Liege* (1998), part 2: 1089.
6. E. N. Kablov, V. N. Tolorayya, N. G. Orekhov, and I. M. Demonis, *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, No. 1: 118 (2004) (in Russian).
7. S. Z. Kopelev, M. N. Galkin, A. A. Kharin, and I. V. Shevchenko, *Teplovye i Gidravlicheskie Kharakteristiki Okhlazhdaemykh Lopatok Gazovykh Turbin* [Thermal and Hydraulic Characteristics of Cooled Blades of Gas Turbines] (Moscow: Mashinostroenie: 1993) (in Russian).
8. A. A. Inozemtsev, M. A. Nikhamkin, and V. L. Sandratskiy, *Osnovy Konstruirovaniya Aviatsionnykh Dvigately i Energeticheskikh Ustanovok* [The Fundamentals of Designing Aircraft Engines and Power Plants] (Moscow: Mashinostroenie: 2008), vol. 2 (in Russian).
9. H. Matsuzaki, Y. Suto, Y. Kanazawa, M. Sato, I. Kobayashi, and Y. Kobayashi, *Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, 4, Paper No: 96-GT-294, V004T10A018 (2015).
10. R. L. Altman, *Gas Turbine Technology Benefits for Commercial Airplane Operator* (Pratt and Whitney, United Technologies: 1991).
11. *XF9-1, the World's Best Standards Fighter Engine, Has Been Completed — Japan's Military Technology, Interview with the Developer, BLOGOS*, Part 1/2 (2019) (in Japanese).
12. E. O. Fomichev and N. N. Voronin, *Dvigatel'*, No. 5: 18 (2013) (in Russian).
13. A. Supov, S. Dautov, V. Koval'chuk, O. Ospennikova, V. Lukin, and M. Samorukov, *Sci. Intensive Tekhnol. Mekhan. Eng.*, 1, No. 3: 28 (2016) (in Russian).
14. A. V. Lyushinskiy, *Svarochnoe Proizvodstvo*, 30, No. 7: 17 (2016) (in Russian).
15. E. V. Galieva, V. A. Valitov, R. Ya. Lutfullin, S. Dmitriev, A. Akhunova, and M. Mukhametrakhimov, *Materials Science Forum*, 838–839: 350 (2016).
16. V. M. Bychkov, A. S. Selivanov, A. Yu. Medvedev, V. A. Supov, B. O. Bol'shakov, R. R. Grin', and F. F. Musin, *Vestnik UGATU*, 16, No. 7: 112 (2012) (in Russian).
17. V. P. Morochko, L. I. Sorokin, and N. Yu. Zybko, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 12: 42 (1980) (in Russian).
18. L. I. Sorokin, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 7: 11 (2003) (in Russian).
19. C. Wiednig, C. Lochbichlerb, N. Enzinger, C. Beala, and C. Sommitsch, *Proc. Engineering*, No. 86: 184 (2014).
20. K. A. Yushchenko, B. A. Zaderiy, I. S. Gakh, and O. P. Karasevskaya, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 8: 21 (2016) (in Russian).
21. K. A. Yushchenko, I. S. Gakh, B. A. Zaderiy, A. V. Zvyagintseva, and O. P. Karasevskaya, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 5: 46 (2013) (in Russian).