

PHYSICAL AND TECHNICAL BASIS OF EXPERIMENT AND DIAGNOSTICS

PACS numbers: 68.35.bd, 68.35.Gy, 68.37.Hk, 81.20.Vj, 81.40.Jj, 81.40.Np

Нові підходи в оцінці механічних характеристик та мікроструктури відновлених деталей ГТД із нікелевих жароміцних сплавів

К. А. Ющенко, Г. В. Звягінцева, О. В. Яровицин, М. О. Черв'яков,
Г. Д. Хрущов, І. Р. Волосатов

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

Необхідність оцінки працездатності деталей авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) обумовила використання методів чисельного прогнозування схильності до утворення тріщин, застосування фіксації показників погонних тепловкладень у виріб при наплавленні, розробку і опробування спеціальних методик визначення високотемпературних механічних характеристик зразків з різних зон зварного з'єднання «основний–наплавлений метал». Проведено аналіз результатів випробувань на короточасну міцність та пластичність спеціально підготовлених зразків та прогнозування стійкості проти виникнення гарячих тріщин в різних зонах зварного з'єднання важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів, що імітують відновлені деталі авіаційного двигуна. Досліджено мікроструктуру та поверхні руйнування зразків. Використання комплексного підходу до технологічних можливостей, режимів та методів наплавлення в перспективі дозволить удосконалити відновлення елементів авіаційних ГТД з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів та розширити асортимент деталей, які можна відновити багат шаровим наплав-

Corresponding author: Ganna Vitaliivna Zviagintseva
E-mail: zvanna@paton.kiev.ua

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

Citation: K. A. Yushchenko, G. V. Zviagintseva, O. V. Yarovytsyn, N. O. Chervyakov, H. D. Khrushchov, and I. R. Volosatov, New Approaches in Evaluation of Mechanical Characteristics and Microstructure of Restored Parts of GTE from Nickel Heat-Resistant Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 10: 1345–1364 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.10.1345](https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345).

ленням або виготовити з використанням адитивних технологій.

Ключові слова: нікелеві жароміцні сплави, наплавлений метал, напружено-деформований стан, міцність, падіння пластичності, поверхня руйнування.

The necessity of evaluation of working capacity of parts of aircraft gas turbine engines (GTE) promotes application of methods of numerical prediction of tendency to crack formation, registration of indices of line heat input in the product in surfacing process, development and testing of special procedures for determination of high-temperature mechanical characteristics of samples from various zones of welded joint 'base-deposited metal'. Numerical prediction of a kinetics of temperature and stress-strain states during deposition of plate edge taking into account dependent on temperature thermophysical (c_p , λ , α) and mechanical (E , σ_y) properties of material is carried out based on the algorithms developed at E. O. Paton Electric Welding Institute. As determined, for ZhS6K alloy the rise of deposition height to ≈ 12 mm and its length for more than 100 mm rapidly increases the possibility of crack appearance in HAZ of 'base metal-deposited metal' welded joint and in low beads of multi-layer deposited metal. These calculations have good correlation with the data of analysis of technological probes of ZhS6-ZhS6K(NM), ZhS6-ZhS6U(NM) systems with registration of line heat input into the product. As established, the value of yield strength $\sigma_{0.2}$ for ZhS6K base metal is 1.05–1.22 and value of tensile strength σ_t is 0.72 from corresponding indices of base metal in ZhS6K deposited metal in as-deposited state during testing at 1000°C. At the same time deposited metal has low ductility ($\delta = 0.15$ –0.65%). Investigation of microstructure and fracture surface of examined samples allowed classifying failure of deposited metal at 1000°C as an index of interval of ductility dip that take place at temperature of $(0.6$ – $0.8)T_s$. It is recommended, that thermal treatments during restoration of turbine blades of aircraft engines shall include isothermal holding of deposited metal ZhS6K at homogenization temperature that allows rising the value of its ultimate strength to the level not lower than 0.8 in comparison with the corresponding table data of base metal and increase it to ductility values 5.8–7.2%. Thus, a complex approach to application of methods of numerical prediction of tendency to crack formation, registration of indices of line heat input into the product during deposition and analysis of the results of high-temperature mechanical tests from different zones of 'base-deposited metal' welded joint in perspective will allow improvement of technology for restoration of parts of aircraft GTE from difficult-to-weld nickel-based high-temperature alloys and expand assortment of parts, that can be restored using multi-layer surfacing or produce by additive technologies.

Key words: nickel high-temperature alloys, deposited metal, stress-strain state, ductility dip, fracture surface.

Необходимость оценки работоспособности деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) обусловила использование методов численного прогнозирования склонности к образованию трещин, применение фиксации показателей погонных тепловложений в изделие при наплавке, раз-

работку и опробование специальных методик определения высокотемпературных механических характеристик образцов из разных зон сварного соединения «основной–наплавленный металл». Проанализированы результаты испытаний на кратковременную прочность и пластичность модельных наплавленных образцов, изготовленных по специально разработанной методике. Исследована их микроструктура и поверхности разрушения. Проведён прогноз устойчивости к возникновению горячих трещин в различных зонах сварного соединения, имитирующего восстановленные детали авиационного двигателя. Использование комплексного подхода к технологическим возможностям, режимам и методам наплавки в перспективе позволит усовершенствовать восстановление элементов авиационных ГТД из трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов и расширить ассортимент деталей, которые можно восстанавливать многослойной наплавкой или изготавливать с использованием аддитивных технологий.

Ключевые слова: никелевые жаропрочные сплавы, наплавленный металл, напряженно-деформированное состояние, прочность, падение пластичности, поверхность излома.

(Отримано 15 травня 2019 р.; остаточн. варіант — 3 вересня 2019 р.)

1. ВСТУП

Технології на основі послідовного нанесення шарів наплавленого металу, зокрема з використанням присадного матеріалу у вигляді порошку, активно використовуються в сучасній промисловості для отримання складних 3D форм металевих деталей.

Мікроплазмове порошкове наплавлення (МПН) для серійного ремонту деталей авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) із важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів в даний час застосовується в умовах виробництва [1, 2]. Аналіз актуальних задач ремонту деталей авіаційних ГТД та історії розвитку технології МПН з урахуванням відомих публікацій та досвіду науково-дослідних робіт Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона [3–5] свідчить, що основною тенденцією її розвитку за останні 10–15 років є перехід від одно-двошарового наплавлення до багат шарового з поступовим освоєнням нових зон ремонту у двох напрямках: за висотою H та довжиною L наплавленого валика. Ширина вузької основи (кромки деталі авіаційного ГТД) при цьому в більшості випадків залишається в діапазоні 1,5–2,5 мм. Таким чином, спостерігається поступове освоєння процесом МПН технологій серійного ремонту в діапазоні енергетичних параметрів сили зварювального струму $I \leq 35$ А та погонних енергій $q_n/v \leq 1500$ Дж/мм, що передбачає збільшення об'ємів наплавленого металу в діапазоні від 0,5–2,0 см³ до 10–20 см³.

Забезпечення працездатності деталей авіаційних ГТД з обмежено

зварюваних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС26, ЖС32, ЖС6, що відновлені МПН, обумовило актуальність розробки і використання спеціальних методик визначення рівня властивостей короткочасної міцності і пластичності та стійкості проти виникнення тріщин в різних зонах зварних з'єднань «основний–наплавлений метал».

Аналіз розглянутих технологічних проб, що отримані в зазначеній вище області параметрів режимів відновлення з фіксацією значень показників загальних тепловкладень у виріб, показав, що для систем ЖС6У-ЖС6К утворення тріщин має місце переважно в наплавленому металі при перевищенні його об'єму V_n та сумарних погонних тепловкладень у виріб $\sum q_n/v$ в залежності від довжини наплавленого валика L : $V_n > 9-10 \text{ см}^3$ і $\sum q_n/v > 10 \text{ кДж/мм}$ при $L = 50-60 \text{ мм}$ та $V_n > 2-3,5 \text{ см}^3$ і $\sum q_n/v > 1,5-2,5 \text{ кДж/мм}$ при $L > 100 \text{ мм}$. При довжині наплавленого валика $L = 50-60 \text{ мм}$ технологічна міцність наплавлених сплавом ЖС6К заготовок зберігається при наплавленні загальною висотою $\cong 25-30 \text{ мм}$. Термічні обробки вищевказаних зразків імітували базові технологічні схеми відновлення робочих лопаток, зокрема авіаційного ГТД РД-33. З урахуванням результатів технологічних проб, геометричні розміри і форма зразка для механічних випробувань вибираються з урахуванням розмірів вихідної зварної заготовки певних граничних розмірів, при яких не проявляється схильність важкозварюваного нікелевого жароміцного сплаву до утворення тріщин. Сучасні національні гармонізовані [6–9] і міжнародний [10] стандарти при оцінці короткочасних властивостей зварних з'єднань при підвищених температурах зазвичай використовують зразки значно більших розмірів. Тому на основі базових рекомендацій діючої НТД запропонована раціональна форма плоского пропорційного зразка з робочим перетином $6-10 \text{ мм}^2$. Габарити захватів такого зразка також зменшені за рахунок застосування проміжних перехідників до захватів випробувальної машини.

Метою даної роботи була оцінка жароміцності та тріщиностійкості наплавлених деталей шляхом аналізу короткочасних механічних характеристик зразків, що виготовлені згідно запропонованої методики визначення високотемпературних властивостей та даних металографічного та фрактографічного аналізу модельного зварного з'єднання типу «багатошаровий наплавлений метал» зі сплаву ЖС6К.

Також перевірялась можливість прогнозування вірогідності утворення тріщин в наплавлених зразках за допомогою попереднього аналізу напружено-деформованого стану за допомогою комплексу програм «Зварювання нікелевих сплавів» на базі розроблених в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона алгоритмів та програмного пакету WeldPrediction.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зразки для досліджень представляли собою багатопшарове наплавлення жароміцного нікелевого сплаву ЖС6К (табл. 1) на торець пластини товщиною 2–4 мм. Ширина наплавленого валика складала 5–6 мм, довжина наплавленого валика складала 55–65 мм.

Термічні обробки зразків наплавленого металу відповідали базовим технологічним схемам відновлення деталей авіаційних ГТД для наплавленого металу ЖС6К згідно ОСТ1 90126-85 «Сплавы литейные жаропрочные вакуумной выплавки». Для оцінки високотемпературних механічних властивостей було підготовлено відповідні зразки у стані: після наплавлення; після термічної обробки при 1050°C — 2,5 год.; після термічної обробки при температурі гомогенізації 1220°C протягом 2–4 год. Вказані термічні обробки зразків для механічних випробувань виконували для всієї зварної заготовки.

У кожному із наведених на рис. 1 випадків технологічна проба представляє собою пошарове наплавлення на торець пластинки з

ТАБЛИЦЯ 1. Хімічний склад сплаву ЖС6К.

TABLE 1. The chemical composition of the ZhS6K alloy.

Масовий вміст елементів, %												
C	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Mn	Si	Fe	B
0,13–0,2	9,5–12,0	Осн.	4,0–5,5	5,0–6,0	2,5–3,2	3,5–4,8	4,5–5,5	1,4–1,8	<0,4	<0,4	<2,0	<0,02

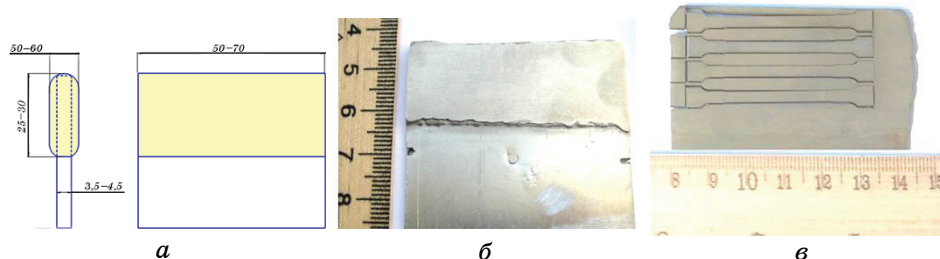


Рис. 1. Схема (а) та зовнішній вигляд заготовки «основного–наплавленого металу» (б) та особливості вирізки (в) з неї зразків наплавленого металу для високотемпературних механічних випробувань нікелевих жароміцних сплавів.

Fig. 1. Scheme (a) and appearance of obtained polished billet 100% of base metal (b) and peculiarities of cutting (c) of samples of deposited metal from it for high-temperature mechanical tests of nickel high-temperature alloys.

нікелевого жароміцного сплаву. Довжина даної пластинки або фрагменту відповідно дорівнює довжині наплавленого валика $L \approx 35-40$ мм, $L \approx 50-60$ мм і $L \approx 140-250$ мм, а її товщина та максимальна кількість шарів наплавлення обираються з деяким запасом для більшої гарантії стійкості досліджуваного технологічного варіанту проти порушень технологічної міцності. Пошарове наплавлення таких проб здійснювалося в типових умовах МПН з погонною енергією $400-1500$ Дж/мм та охолодженням поверхні металу до $T = 20^\circ\text{C}$ перед накладенням наступного валика. В проміжках між накладенням шарів наплавлення проводився візуальний та капілярний контроль, а після наплавлення певної кількості валиків відбиралися зразки для металографічного контролю. Металографічний контроль проводився методом оптичної мікроскопії на мікроскопі Neophot-32 при збільшенні $\times 50-250$ у повздовжньому перетині зварного з'єднання «основний–наплавлений метал»; площа металографічних досліджень орієнтовно відповідала середині товщини основного та наплавленого металу. З метою збільшення достовірності результатів щодо забезпечення технологічної міцності зварного з'єднання «основний–наплавлений метал» металографічний контроль виконувався не тільки у стані після наплавлення, а й після тестової термічної обробки. Вважалось, що технологічна міцність даного зварного з'єднання «основний–наплавлений метал» забезпечується, якщо до і після вказаної термічної обробки було зафіксовано відсутність макро- та мікротріщин.

Інформацію про склад структурних складових, в тому числі ідентифікацію карбідів, та фрактографію поверхні отримано за допомогою скануючого електронного мікроскопу фірми «JEOL» із енергодисперсійним спектрометром.

Із підготовлених зварних заготовок наплавлення на торець пластини розміром $55 \times (25-30) \times (3,5-4,5)$ мм³, в яких відсутні тріщини, виготовлено зразки для випробувань на сервогідравлічній машині MTS-810 при кімнатних та підвищених температурах. Виконано випробування на статичний розтяг зразків «100% наплавленого металу» із сплаву ЖС6К. Умови підготовки зварної заготовки максимально обмежували дію негативних чинників «штучного» завищення жорсткості зварного з'єднання і кількості тепловкладень (складало не більше 2,0–2,5 разів), а умови проведення випробувань імітували реальну технологію відновлення кромek робочих лопаток авіаційних ГТД.

3. ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ

З метою попереднього аналізу напружено-деформованого стану при багатошаровому наплавленні вузької основи, на базі розроблених в

ІЕЗ ім. Є. О. Патона алгоритмів та програмного пакету WeldPrediction, створено комплекс програм «Зварювання нікелевих сплавів», що дозволяє проаналізувати розподіл температур та визначити кінетику напружено-деформованого стану поблизу зварювальної ванни складнолегованих сплавів на основі нікелю [11, 12] з урахуванням залежних від температури теплофізичних (c_γ , λ , α) і механічних (E , $\sigma_{0,2}$) властивостей матеріалу.

Для розглянутої пластини в процесі зварювального нагріву визначається температурне поле $T(x, y, z, t)$ у часі, потім за середнім значенням температури $T(x, y, t)$ вирішувалося завдання по кінетиці напружень і деформацій. В основу покладено метод послідовного простежування в часі з кроком Δt і метод скінчених елементів у просторі, тобто розглянута область представлялася сукупністю елементарних об'ємів розмірами $h_x \times h_y \times h_z$. Розмір одиничного елемента в моделі становить $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ мм}^3$.

Температурне поле в елементі, що зварюється, визначається на основі теорії теплопровідності з урахуванням рухомого джерела тепла, ефективна теплова потужність $q_{\text{еф}}$ якого розподілена за нормальним законом, тобто

$$g(x, y, z, t) = g_0 \exp[-K_x(x - x_n)^2 - K_y y^2 + K_z z^2], \quad (1)$$

де $g(x, y, z, t)$ — інтенсивність тепловиділень, Дж/см³·с, K_x, K_y, K_z — коефіцієнти зосередженості теплового потоку відповідно по напрямках x, y, z , $x_n = x_n(t)$ — координати центру джерела по осі x при $y_n = z_n = 0$:

$$x_n(t) = x_0 + vt, \quad (2)$$

де v — швидкість зварювання,

$$g_0 = \frac{2q_{\text{еф}} \sqrt{K_x K_y K_z}}{\pi^{3/2}}, \quad q_{\text{еф}} = U_d I_{\text{зв}} \eta_{\text{еф}}, \quad (3)$$

$U_d, I_{\text{зв}}$ — параметри дугового зварювання плавленням, $\eta_{\text{еф}}$ — ефективний к.к.д. нагріву.

Поширення тепла у зразку, що нагрівається, у рамках теорії теплопровідності Фур'є, засноване на допущенні, що в елементарному об'ємі підвід (відвід) тепла проводиться тепловим потоком, вектор якого \mathbf{f} у довільній точці x, y, z може бути представлено трьома компонентами через компоненти градієнта температур і компоненти тензора теплопровідності $\lambda_{xx}, \lambda_{yy}, \lambda_{zz}$

$$f_x = \lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x}, f_y = \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y}, f_z = \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (4)$$

Використовувалася гіпотеза плоского напруженого стану, згідно з якою тензор напружень σ_{ij} у будь-якій точці x, y у момент часу t представляється у вигляді

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}, \quad (\sigma_{yx} = \sigma_{xy}), \quad (5)$$

де компоненти тензора σ_{ij} у кожній точці x, y розглянутої області задовольняють рівнянням рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

Тензор деформацій ε_{ij} має аналогічну тензору σ_{ij} структуру, тобто

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix}, \quad (\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}), \quad (7)$$

де компоненти $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yy}$ пов'язані з переміщеннями U_x і U_y співвідношеннями

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right). \quad (8)$$

У довільний момент часу t тензор ε_{ij} можна представити у вигляді суми тензорів

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c, \quad (9)$$

де ε_{ij}^e — тензор пружної деформації, ε_{ij}^p — тензор непружної деформації миттєвої пластичності, ε_{ij}^c — тензор непружної деформації повзучості.

Зв'язок між тензором σ_{ij} і тензором ε_{ij}^e визначається законом Гука, тобто з урахуванням температурних і мікроструктурних змін Φ у точці x, y у момент часу t у порівнянні з $t = 0$, мають місце залежності

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij} [K\sigma + \Phi(t) - \Phi(0)], \quad (i, j = x, y), \quad (10)$$

де δ_{ij} — одиничний тензор або символ Кронекера, тобто $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ і $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$, $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) / 3$, $G = E / [2(1 + \nu)]$ — модуль зсуву, E — модуль нормальної пружності, ν — коефіцієнт Пуассона, $K = (1 - 2\nu) / E$ — модуль об'ємного стиску.

Зв'язок тензора напружень σ_{ij} з деформаціями миттєвої пластичності ε_{ij}^p в сучасних комерційних пакетах комп'ютерних програм,

як і в пакеті Welpredictions, формулюється на основі теорії плинності, асоційованої з умовою плинності Мізеса, тобто фіксується зв'язок між тензором збільшень пластичних деформацій $\Delta \varepsilon_{ij}^p$ і девіатором напружень $\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$ у вигляді

$$\Delta \varepsilon_{ij}^p = \Delta \lambda (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad (i, j = x, y) \quad (11)$$

де скалярна функція $\Delta \lambda$ визначається умовою плинності через поверхню плинності

$$f = \sigma_i^2 - \sigma_{0,2}^2(T), \quad (12)$$

де

$$\sigma_i = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + 6\sigma_{xy}^2}, \quad (13)$$

$\sigma_{0,2}(T)$ — границя плинності матеріалу в точці x, y при температурі $T(t)$.

Як і простежування розвитку температурного поля $T(x, y, t)$ у часі, що здійснюється послідовно через кінцеві збільшення часу Δt , так і простежування розвитку пружно-пластичних деформацій також здійснюється поетапно, починаючи з моменту $t = 0$ через певні проміжки часу Δt .

За цей крок простежування тензор деформацій одержить кінцеве збільшення

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^e + \Delta \varepsilon_{ij}^p, \quad (14)$$

або з урахуванням (7), (8)

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \psi (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij} K \sigma - b_{ij}, \quad (15)$$

де

$$\psi = \frac{1}{2G} + \Delta \lambda, \quad b_{ij} = \left(\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} \right)_{t-\Delta t} + \delta_{ij} [(K\sigma)_{t-\Delta t} - \Delta \phi]. \quad (16)$$

Функція ψ відображає стан матеріалу в точці x, y у момент часу t . Вона або дорівнює $1/(2G)$ (пружна поведінка), або більше $1/(2G)$ — пружно-пластична поведінка. Умова плинності дозволяє побудувати ітераційний процес уточнення функції ψ . Величина b_{ij} відома для етапу простежування (моменту часу t), якщо відомий розв'язок на етапі $(t - \Delta t)$.

Залежність (16) на кожній ітерації по ψ , тобто коли ψ задане, зводить розглянуту задачу до добре відомої задачі теорії термопружно-

сті з додатково заданими деформаціями b_{ij} . Для розв'язку таких задач досить добре розвинені чисельні методи, засновані на методі скінчених елементів.

Для вирішення задачі теплопровідності потрібно мати такі дані для досліджуваного матеріалу (в залежності від температури): теплопровідність, густину, теплоємність, температури ліквідус та солідус. Вирішення задач механіки потребує даних: модуль пружності, границя плинності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт теплового розширення. Для оцінки кінетики напружено-деформованого стану зразка використовувалася розрахункова методика, заснована на послідовному простежуванні розвитку пружно-пластичних деформацій у точках x , y розглянутого зразка під час зміни температури в процесі руху джерела нагрівання.

Моделювання виконувалося відповідно до умов мікроплазмового порошкового наплавлення шести валиків на торець пластини з жароміцного нікелевого сплаву розмірами $40 \times 100 \times 2,5$ мм³.

Типовий розподіл температурних полів в площині пластини при наплавці першого валика поблизу рухомої вздовж осі X зварювальної ванни наведено на рис. 2.

На основі аналізу результатів прогнозування залишкового напруженого стану виявлено формування значних залишкових поздовжніх напружень в наплавленому металі з максимальними значеннями до $0,9\sigma_{0,2}$ (рис. 3), які значно перевищують поперечні та дотичні напруження, що сягають в наплавленому металі $0,5\sigma_{0,2}$ та $0,3\sigma_{0,2}$ відповідно.

Перерозподіл поздовжніх тимчасових напружень σ_{xx} у площині пластини при виконанні другого валика показано на рис. 4. Попереду зварювальної ванни поздовжні напруження σ_{xx} стискаючі, од-

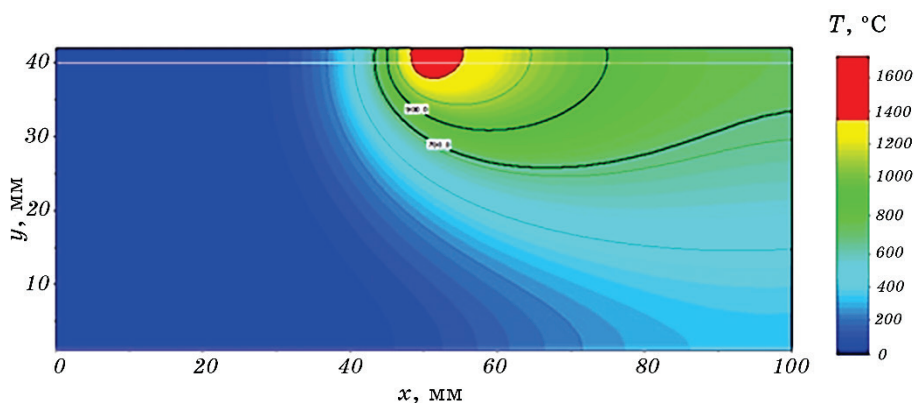


Рис. 2. Типовий розподіл температурних полів в площині пластини.

Fig. 2. Typical distribution of temperature fields in plate plane.

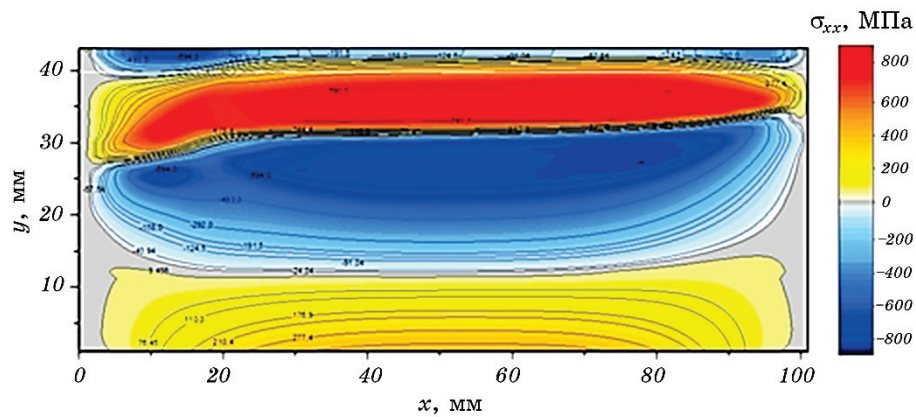


Рис. 3. Розподіл залишкових поздовжніх напружень у площині пластини при наплавленні першого валика.

Fig. 3. Distribution of residual longitudinal stresses in plate plane in first bead deposition.

нак уже на відстані близько 20 мм за зварювальною ванною напруження стають розтягуючими. Вони швидко наростають і при охолодженні зварного з'єднання існують по всій довжині шва.

Результати математичного моделювання напружень після наплавлення останнього (шостого) валика для найбільш навантаже-

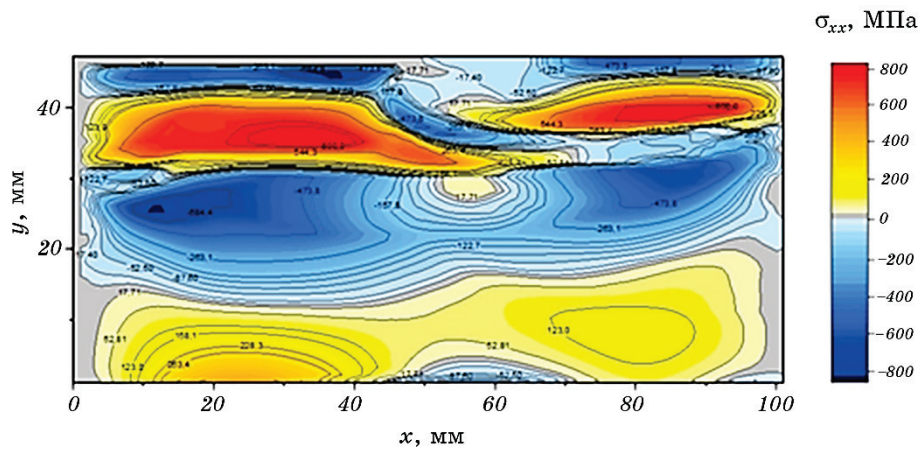


Рис. 4. Розподіл поздовжніх тимчасових σ_{xx} напружень у площині пластини при наплавленні другого валика.

Fig. 4. Distribution of longitudinal temporary stresses σ_{xx} in plate plane at deposition of second bead.

них зон представлені на рис. 5.

Таким чином, результати моделювання показують, що напружений стан в площині пластини після наплавлення шести валиків характеризується досить значним рівнем залишкових напружень в поздовжньому напрямі, які значно перевищують поперечні σ_{yy} та дотичні напруження σ_{xy} в зоні наплавленого металу.

Згідно розрахункам, при збільшенні висоти наплавлення до ≈ 12 мм та його довжини більше 100 мм різко підвищується вірогідність виникнення тріщин в ЗТВ зварного з'єднання «основний–наплавлений метал» і в передостанніх валиках багат шарового наплавленого металу. Але аналіз технологічних проб показує, що тріщини в більшості випадків мають місце в передостанніх валиках наплавленого металу ніж в ЗТВ, що можна пояснити станом границь зерен після повторного нагріву. Отримані розрахункові дані підтверджують адекватність режимів МПН та розмірів виготовлених для досліджень зразків.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Встановлено, що в наплавленому металі ЖС6К у стані як безпосередньо після наплавлення, так і після термічної обробки 1050°C — 2,5 год при випробуваннях на статичний розтяг при 1000°C значення межі плинності $\sigma_{0,2}$ приблизно в 1,05–1,22 рази вище відповідно-

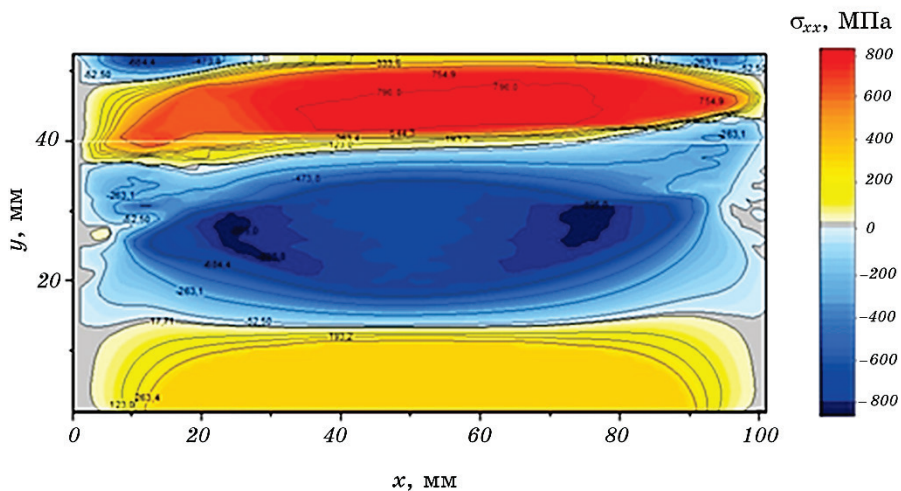


Рис. 5. Розподіл поздовжніх залишкових σ_{xx} напружень у площині пластини після наплавлення шостого валика.

Fig. 5. Distribution of residual longitudinal stresses in plate plane after deposition of sixth bead.

го показника основного металу ЖС6К, а значення межі міцності σ_B знаходиться орієнтовно на рівні 0,72 від відповідного показника основного металу ЖС6К (рис. 6). Після проведення гомогенізації для наплавленого металу ЖС6К (табл. 2) можливий вихід на наступний відносний рівень міцності порівняно з табличними даними основного металу ЖС6К при 20°C і 1000°C — на рівні не менше 0,8, що відповідає показникам експлуатаційних характеристик відновлених деталей.

Наплавлений метал нікелевого жароміцного сплаву ЖС6К в стані після наплавлення та у стані після термічної обробки 1050°C — 2,5 год при 1000°C має низьку пластичність — як правило, $\delta = 0,15\text{--}1,2\%$, що у 3 рази менше за відповідний показник табличних даних основного металу ЖС6К (табл. 2). Це може бути у ряді випадків

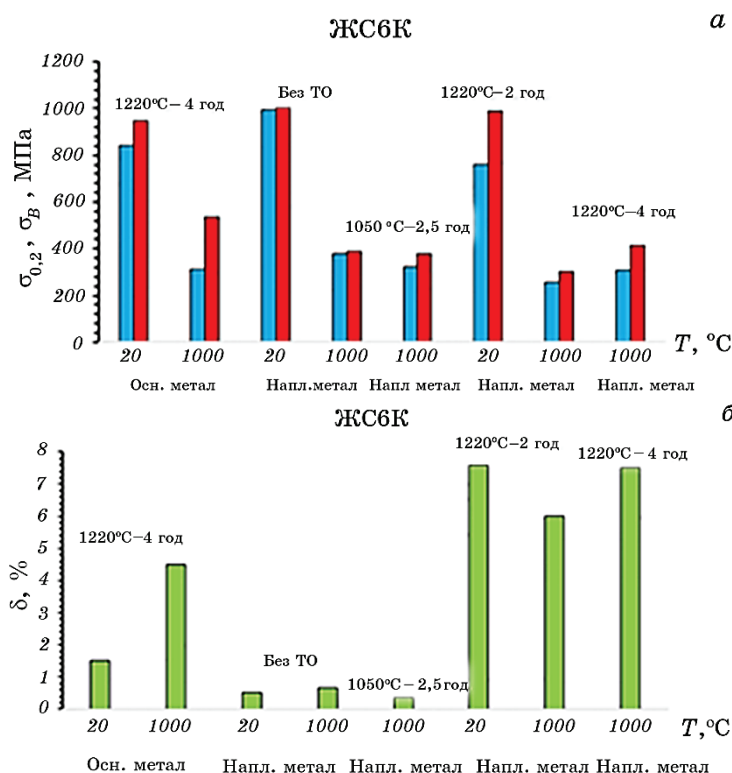


Рис. 6. Розподіл значень межі плинності $\sigma_{0.2}$, межі міцності σ_B (а) і відносного видовження δ (б) у основному та наплавленому металі нікелевого жароміцного сплаву ЖС6К в залежності від різних видів термічної обробки.

Fig. 6. Distribution of values of yield strength $\sigma_{0.2}$, tensile strength σ_t (a) and specific elongation δ (b) in base and deposited nickel high-temperature alloy ZhS6K depending on different types of heat treatment.

ТАБЛИЦЯ 2. Значення межі плинності $\sigma_{0,2}$, межі міцності σ_B (a) і відносного видовження δ для основного металу ЖС6К (за даними роботи [13]).

TABLE 2. The value of the yield strength $\sigma_{0,2}$, tensile strength σ_t (a) and specific elongation δ for the base metal ZhS6K (according to Ref. [13]).

Сплав	$T_{\text{випр}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\delta, \%$
ЖС6К	20	830–850	900–1000	1,5
ЖС6К	1000	300–320	500–570	4,5

причиною схильності наплавленого металу ЖС6К до утворення тріщин повторного нагріву. Високотемпературна пластичність наплавленого металу ЖС6К суттєво зростає тільки після проведення термічної обробки у вигляді ізотермічної витримки при температурі гомогенізації 1220°C протягом 2–4 год до значень 5,8–7,2%.

В наплавленому металі, порівняно з основним, змінюється структура карбідів, які мають дрібніший розмір, розташовані переважно по межах зерен. Таке явище може негативно впливати на характеристики міцності та пластичності [14].

Поверхні зламу зразків, що випробувані як безпосередньо після МПН, так і після термообробок, мають вигляд крихкого руйнування по межах зерен. Однак, після термообробки 1220°C — 2 год поверхня має сліди мікропластичної деформації, а елементи структури на поверхні зламу більш рівномірно розподілені за розмірами (рис. 7).

Збільшення часу гомогенізації наплавленого металу ЖС6К до 4 год призводить при випробуваннях на статичний розтяг при 1000°C до збільшення значення межі плинності $\sigma_{0,2}$ орієнтовно до рівня відповідного показника основного металу ЖС6К, а значення границі міцності σ_B збільшується до рівня 0,78 відносно відповідного показника основного металу ЖС6К. При цьому пластичність наплавленого металу ЖС6К продовжує зростати ($\delta = 7,2\%$), що перевищує у 1,6 рази відповідний показник основного металу ЖС6К ($\delta = 4,5\%$).

Отримані дані свідчать про наявність у наплавленому металі ЖС6К інтервалу провалу пластичності з пониженою деформаційною здатністю. Із збільшенням шарів наплавлення вірогідність падіння пластичності та виникнення тріщин збільшується, оскільки напружений стан в площині пластини після наплавлення шести валиків характеризується досить значним рівнем залишкових напружень в поздовжньому напрямі ($\sigma_{xx} = 800 \text{ МПа}$, що становить близько $0,9\sigma_{0,2}$). Іще однією причиною є стан границь із карбідними включеннями та активізація сегрегаційних процесів при повторному нагріві в процесі накладання наступних валиків [14, 15].

Відновлення пластичності наплавленого металу ЖС6К до рівня $\delta = 5,8\text{--}7,2\%$ спостерігається лише після проведення термічної об-

робки по режиму гомогенізації протягом 2–4 год.

Таким чином, дослідження зразків наплавленого металу нікеле-

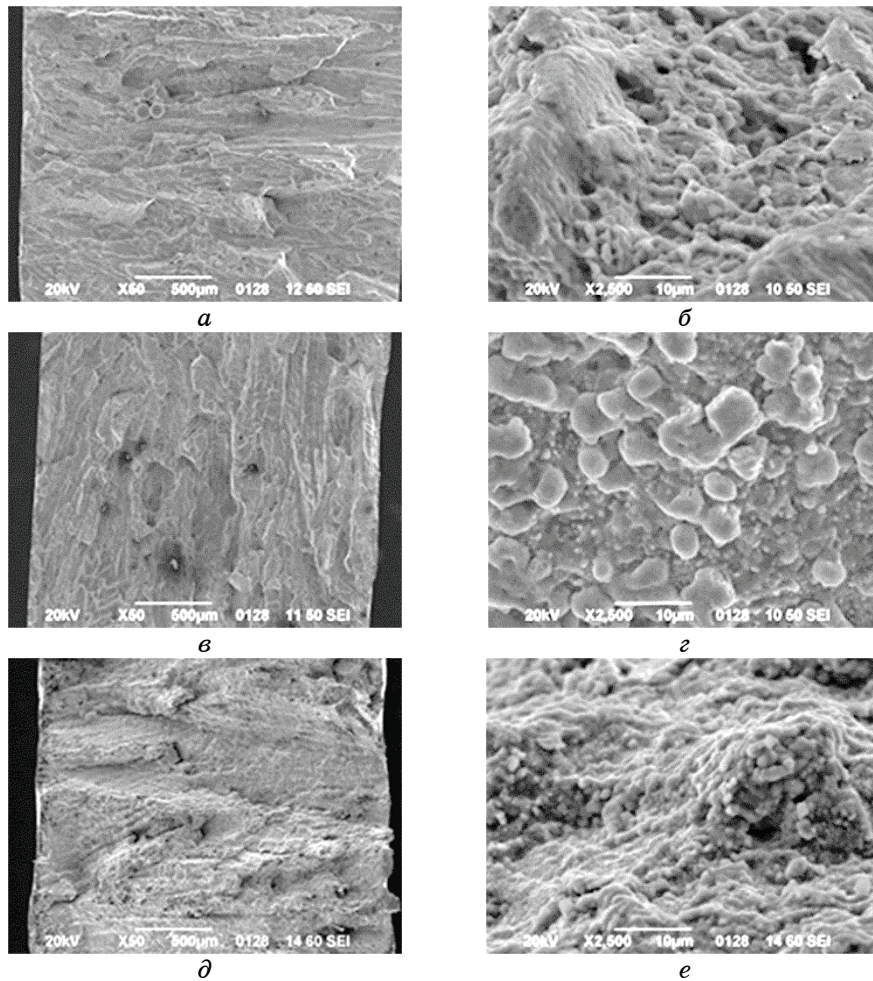


Рис. 7. Поверхня руйнування зразка «наплавлений метал» ЖС6К після випробувань на короткочасну міцність при $T = 1000^{\circ}\text{C}$ за різних збільшень: МПН, $\times 50$ (а); МПН, $\times 2500$ (б); МПН + термообробка 1050°C 2 год, $\times 50$ (в); МПН + термообробка 1050°C 2 год, $\times 2500$ (г); МПН + термообробка 1220°C 2 год., $\times 50$ (д); МПН + термообробка 1220°C 2 год, $\times 2500$ (е).

Fig. 7. Fracture surface of 'deposited metal' sample of ZhS6K after short-term strength testing at $T = 1000^{\circ}\text{C}$ at different magnifications: microplasma surfacing, $\times 50$ (a); microplasma surfacing, $\times 2500$ (б); microplasma surfacing + heat treatment 1050°C 2 h, $\times 50$ (в); microplasma surfacing + heat treatment 1050°C 2 h, $\times 2500$ (г); microplasma surfacing + heat treatment 1220°C 2 h, $\times 50$ (д); microplasma surfacing + heat treatment 1220°C 2 h, $\times 2500$ (e).

вого жароміцного сплаву ЖС6К, що отримані способом МПН, показали достатню для експлуатації виробів межу міцності. Застосування у якості зварювального джерела нагріву мікроплазмової дуги з одночасним введенням у зварювальну ванну присадного порошку ЖС6К, аналогічно з простим оплавленням поверхні основного металу ЖС6У [16], призводить до різкого падіння пластичності переплавленого об'єму металу, отриманого після кристалізації зварювальної ванни, в певному температурному інтервалі, зокрема — при 1000°C . Даний ефект обумовлений типовими рисами будь-якого зварювального джерела нагріву — локалізацією тепловкладень, великим температурним градієнтом в зоні нагріву, коротким часом існування розплавленого металу зварювальної ванни, великими швидкостями охолодження металу після його кристалізації. Небезпеку становить феномен температурного інтервалу падіння пластичності (ТПП), яких характерний для нікелевих сплавів з ГЦК-граткою. Його прояв підсилюється високим вмістом зміцнюючої γ' -фази, наявністю залишкових напружень в повздовжньому напрямку шва при підвищених температурах, наявністю сегрегаційних процесів та випадання карбідів типу Me_{23}C_6 по межах зерен [14, 15].

На даний момент ефективним технологічним заходом запобігання утворенню тріщин при відновленні кромek лопаток авіаційних ГТД є одночасне обмеження ефективної потужності мікроплазмової дуги, сумарних погонних тепловкладень у виріб і об'єму наплавленого металу, особливо — довжини наплавленого валика. Розширення застосування процесу МПН за межі відновлення кромek робочих лопаток авіаційних ГТД за декілька шарів наплавленого металу з точки зору авторів даної роботи вимагає як оптимізації даного процесу в напрямку одночасного зменшення ефективної потужності дуги і погонної енергії наплавлення, так і більш детальних досліджень закономірностей перебігу періодичних термодеомаційних циклів в реальних структурах наплавленого металу нікелевого жароміцного сплаву з високим вмістом зміцнюючої γ' -фази. Поки що не існує чітких уявлень щодо механізму послідовної релаксації залишкових напружень в умовах багат шарового наплавлення для матеріалу з обмеженою дефомаційною здатністю в діапазоні температур $(0,6-0,8)T_s$. Додаткового дослідження також потребує енергія меж зерен та вивчення впливу на їх стан підвищених температур.

5. ВИСНОВКИ

1. Аналіз розглянутих технологічних проб з фіксацією значень показників загальних тепловкладень у виріб показав, що для систем ЖС6-ЖС6К(НМ) утворення тріщин переважно співвідноситься з перевищенням об'єму наплавленого металу V_n та сумарних погон-

них тепловкладень у виріб $\Sigma q_{\text{н}}/v$ в залежності від довжини наплавленого валика L : $V_{\text{н}} > 9-10 \text{ см}^3$ і $\Sigma q_{\text{н}}/v > 10 \text{ кДж/мм}$ при $L = 50-60 \text{ мм}$ та $V_{\text{н}} > 2-3,5 \text{ см}^3$ і $\Sigma q_{\text{н}}/v > 1,5-2,5 \text{ кДж/мм}$ при $L > 100 \text{ мм}$. Тріщини мають місце переважно у наплавленому металі.

2. За результатами математичного моделювання напружено-деформованого стану показано формування значних залишкових поздовжніх напружень в наплавленому металі з максимальними значеннями до $0,9\sigma_{0,2}$, які значно перевищують поперечні та дотичні напруження, які сягають в наплавленому металі $0,5\sigma_{0,2}$ та $0,3\sigma_{0,2}$ відповідно.

3. На основі аналізу серії технологічних проб для зварного з'єднання важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів і базових рекомендацій діючої нормативно-технічної документації розроблена методика оцінки міцності наплавлених зразків і випробувана на сервогідравлічній машині MTS-810 методом статичного розтягу при підвищених температурах. Встановлено, що у наплавленому металі ЖС6К у стані як безпосередньо після наплавлення, так і після термічної обробки $1050^\circ\text{C} - 2,5 \text{ год}$ при випробуваннях на статичний розтяг при 1000°C значення межі плинності $\sigma_{0,2}$ приблизно в $1,05-1,22$ рази вище відповідного показника основного металу ЖС6К, а значення межі міцності σ_B складає приблизно $0,7-0,8$ від відповідного показника основного металу ЖС6К, що відповідає умовам експлуатації відновлених деталей.

4. Дослідження мікроструктури зруйнованих в ході випробувань на статичний розтяг при 1000°C зразків наплавленого металу ЖС6К показали, що руйнування проходить переважно по границях зерен із наявністю мікротріщин та грубих розшарувань. Проведені дослідження дозволяють класифікувати руйнування наплавленого металу при 1000°C як прояв ТПП, що має місце при температурах $(0,6-0,8)T_s$ (для обраних матеріалів згідно даних диференціального термічного аналізу $T = 800-1000^\circ\text{C}$). В такому випадку збільшується вірогідність виникнення в ЗТВ і нижніх валиках багат шарових швів при зварюванні високолегованих сталей тріщини провалу (падіння) пластичності.

5. Беручи до уваги основну тенденцією розвитку технології МПН важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів за останні $10-15$ років, актуальним завданням є поступове розширення зон ремонту за рахунок збільшення об'ємів наплавленого металу, висоти та довжини наплавленого валика. Для подальшої практичної реалізації, з огляду на обмежену деформаційну здатність, повинен здійснюватися аналіз результатів попереднього математичного моделювання напружено-деформованого стану планованого зварного з'єднання, розрахунок режимів наплавлення та перевірка можливості надійного забезпечення технологічної міцності на відповідних повномасштабних технологічних пробах.

6. Комплексний підхід з застосуванням методів чисельного прогнозування, фіксації показників наплавлення та аналізу результатів механічних випробувань дозволяє удосконалити технологію та розширити асортимент деталей, що можна отримати багатопаровим наплавленням, в тому числі й адитивними технологіями.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Г. П. Калашников, Н. В. Андрейченко, О. С. Белозерцев, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 9: 221 (2005).
2. K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, A. V. Yarovitsyn, A. O. Nakonechny, G. F. Nastenko, V. E. Zamkovoy, O. S. Belozertsev, and N. V. Andreychenko, *The Paton Welding J.*, 8: 21 (2010).
3. P. D. Zhemanyuk, I. A. Petrik, and S. L. Chigilejchik, *The Paton Welding J.*, 8: 39 (2015).
4. К. А. Ющенко, А. В. Яровицын, *Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»*. Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. (Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона: 2012).
5. K. A. Yushchenko, A. V. Yarovitsyn, and N. O. Chervyakov, *The Paton Welding J.*, 5–6: 154 (2016).
6. ДСТУ EN ISO 15792-1:2015 Матеріали зварювальні. Частина 1. Методи випробувань із наплавленого металу зварного шва зі сталі, нікелю і нікелевих сплавів.
7. ДСТУ EN ISO 15792-2:2015 Матеріали зварювальні. Частина 2. Підготовка зразків для випробувань одно- та двосторонніх з'єднань із сталі.
8. ДСТУ EN ISO 5178:2015 Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на повздовжнє розтягування зварного шва в з'єднаннях, виконаних зварюванням плавленням.
9. ДСТУ EN ISO 4136-1:2015 Випробування руйнівні металевих матеріалів. Випробування на розтягування зразка з поперечним швом.
10. ISO 6892-2:2011 *Metallic Materials—Tensile Testing. Part 2: Method of Test at Elevated Temperature*.
11. В. И. Махненко, *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций* (Киев: Наукова думка: 1976).
12. K. A. Yushchenko, V. I. Makhnenko, V. S. Savchenko, E. A. Velikoivanenko, and N. O. Chervyakov, *Welding in the World*, 51, Nos. 9/10: 51 (2007).
13. С. Т. Кишкин, *Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов. Избранные труды* (Москва: Наука: 2006).
14. Bay Vrancken, Ruben Wauthle, Jean-Pierre Kruth, and Jan Van Humbeeck *Proc. of Symp. International Solid Freeform Fabrication (Aug. 16, 2013)* (Laboratory for FF and University of Texas at Austin: 2013), p. 393.
15. K. A. Yushchenko, A. V. Zviagintseva, L. M. Kapitanchuk, and I. S. Gach, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (JAMME)*, 89, No. 2: 49 (2018).
16. І. А. Петрик, *Процеси відновлення зварюванням та паянням лопаток газотурбінних двигунів з важко зварюваних сплавів на нікелевій та титановій основі*.

новій основі (Тези дис. ... на здобуття ступеню канд. техн. наук) (Київ: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ: 2007).

REFERENCES

1. G. I. Peichev, V. E. Zamkovoy, G. P. Kalashnikov, N. V. Andreychenko, and O. S. Belozertsev, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnol.*, **25**, No. 9: 221 (2005) (in Russian).
2. K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, A. V. Yarovitsyn, A. O. Nakonechny, G. F. Nastenka, V. E. Zamkovoy, O. S. Belozertsev, and N. V. Andreychenko, *The Paton Welding J.*, **8**: 21 (2010).
3. P. D. Zhemanyuk, I. A. Petrik, and S. L. Chigilejchik, *The Paton Welding J.*, **8**: 39 (2015).
4. K. A. Yushchenko and A. V. Yarovitsin, *Problemy Resursu i Bezpeky Ekspluatatsiyi Konstruktsiy, Sporud ta Mashyn* [Problems of the Resource and Safety of the Operation of Structures, Structures and Machines] (Kiev: Institut Elektrozvayuvannya im. E. O. Patona N.A.S of Ukraine: 2012) (in Russian), p. 506.
5. K. A. Yushchenko, A. V. Yarovitsin, and N. O. Chervyakov, *The Paton Welding J.*, **5–6**: 154 (2016).
6. *DSTU EN ISO 15792-1:2015 Materialy Zvaryvalni. Part 1* [Welding Materials. Part 1. Methods of Testing of Weld Metal Welds from Steel, Nickel, and Nickel Alloys] (in Ukrainian).
7. *DSTU EN ISO 15792-2:2015 Materialy Zvaryvalni. Part 2* [Welding Materials. Part 2 [Preparation of Samples for Tests of Single- and Double-Sided Steel Joints] (in Ukrainian).
8. *DSTU EN ISO 5178:2015 Vyprovuvannya Ruynivni Zvarnykh Zyednan Metalevykh Materialiv* [Destructive Tests of Welded Joints of Metal Materials. Test for Longitudinal Extension of the Weld in Joints Made by Welding with Melting] (in Ukrainian).
9. *DSTU EN ISO 4136-1:2015 Vyprovuvannya Ruynivni Zvarnykh Zyednan Metalevykh Materialiv* [Destructive Tests of Metal Materials. Tensile Test with Transverse Welds] (in Ukrainian).
10. *ISO 6892-2:2011 Metallic Materials—Tensile Testing. Part 2: Method of Test at Elevated Temperature.*
11. V. I. Makhnenko, *Rasschetnye Metody Issledovaniya Kinetiki Svarochnykh Protessov* [Calculation Methods for the Study of the Kinetics of Welding Stresses and Strains] (Kiev: Naukova Dumka: 1976) (in Russian).
12. K. A. Yushchenko, V. I. Makhnenko, V. S. Savchenko, E. A. Velikoivanenko, and N. O. Chervyakov, *Welding in the World*, **51**, Nos. 9/10: 51 (2007).
13. S. T. Kishkin, *Sozdanie, Issledovanie i Primenenie Zharoprochnykh Splavov* [The Creation, Research and Application of Heat-Resistant Alloys] (Moscow: Nauka: 2006) (in Russian).
14. Bay Vrancken, Ruben Wauthle, Jean-Pierre Kruth, and Jan Van Humbeeck *Proc. of Symp. International Solid Freeform Fabrication (Aug. 16, 2013)* (Laboratory for FF and University of Texas at Austin: 2013), p. 393.
15. K. A. Yushchenko, A. V. Zviagintseva, L. M. Kapitanchuk, and I. S. Gach, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*

(*JAMME*), **89**, No. 2: 49 (2018).

16. I. A. Petrik, *Protsesy Vidnovlennya Zvaryuvannyam ta Payannyam Lopatok Hazoturbinnnykh Dvyhuniv z Vazhkozvaryuvanykh Splaviv na Nikeleviy ta Tytanoviy Osnovi* [Processes of Restoration of Gas Turbine Engine Blades Made of Nickel- and Titanium-Based Hard-to-Weld Alloys by Welding and Brazing] (Thesis of Dissert. for the Degree of Cand. Techn. Sci.) (Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine: 2007) (in Ukrainian).