

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ НА ДОВГОТРИВАЛУ МІЦНІСТЬ ЗРАЗКІВ З ВАЖКОЗВАРЮВАНИХ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ З МІКРОПЛАЗМОВИМ ПОРОШКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

О.В. Яровицин, М.О. Черв'яков, О.О. Наконечний, О.О. Фомакін, С.О. Воронін, О.Ф. Явдощина

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: yarovytsyn@ukr.net

Розроблено методику високотемпературних випробувань на довготривалу міцність зварних з'єднань «основний-наплавлений метал» з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32, що містять більше 60 об'ємних % зміцнюючої γ' -фази. Вона дозволяє з використанням зразків-свідків оцінити рівень довготривалої міцності при температурах 975 та 1000 °С для умов серійного відновлення кромки робочих лопаток сучасних авіаційних газотурбінних двигунів мікроплазмовим порошковим наплавленням. При її розробці враховано необхідність виходу на більші розміри та, відповідно, вищу жорсткість зварної заготовки для виготовлення зразків для механічних випробувань порівняно з типовими умовами серійного відновлення кромки лопатки в промисловості, а також запропоновано ряд прийомів щодо запобігання гарячим тріщинам. Її особливістю є застосування для зразків з робочою частиною 7,5...9,0 мм² захватів типу «ластівчин хвіст», що дозволяє значно зменшити їх розміри. Новий підхід з вибору форми і розмірів зразка, техніки підготовки та формування необхідних для нього зварних заготовок мікроплазмовим порошковим наплавленням дозволяє суттєво зменшити тепловкладення та наблизити режими наплавлення зразків-свідків до промислових режимів серійного відновлення кромки робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів. Завдяки цьому у зварних з'єднаннях «основний-наплавлений метал» нікелевих жароміцних сплавів з направленою кристалізацією, що представляють собою заготовки для наступного виготовлення таких зразків-свідків, вдається уникнути відомих проявів схильності до утворення тріщин в процесі наплавлення та наступної термічної обробки. Розроблену методику апробовано для оцінки довготривалої міцності зразків наплавленого металу ЖС32 та зразків «50 % основного (ЖС26-ВИ або Ж32-ВИ) + 50 % наплавленого (ЖС32) металу» при 975 та 1000 °С на базі 40 год та проведено порівняння відповідних експериментальних даних з вимогами технічних умов на ці литі нікелеві жароміцні сплави. Бібліогр. 22, табл. 3, рис. 11.

Ключові слова: мікроплазмове порошкове наплавлення; зварне з'єднання «основний-наплавлений метал»; важкозварювані нікелеві жароміцні сплави; довготривала міцність

Вступ. У нас в країні в значних об'ємах виробляються та залишаються в експлуатації робочі лопатки з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів (НЖС) ЖС26 та ЖС32 (табл. 1), розрахованих на експлуатацію в сучасних авіаційних газотурбінних двигунах (ГТД) для робочих температур 950...1100 °С. На вітчизняних авіаремонтних підприємствах освоєні серійні технології відновлення бандажованих та небандажованих лопаток на базі процесу мікроплазмового порошкового наплавлення [1–4] із використанням присадного матеріалу рівноцінного рівня легування. Актуальною задачею залишається оцінка механічних властивостей таких зварних з'єднань «основний-наплавлений метал», що компенсують втрати пошкодженого матеріалу деталей в локальних зонах бандажної полиці або торця пера (рис. 1). Зокрема це стосується одного із самих важливих показників таких матеріалів – довготривалої міцності при 975 та 1000 °С [5, 6]. Одночасне поєднання двох несприятливих

факторів – більші розміри та, відповідно, вища жорсткість зварної заготовки порівняно з типовими умовами відновлення кромки лопатки в промисловості і відома висока схильність до утворення тріщин при зварюванні плавленням НЖС з високим

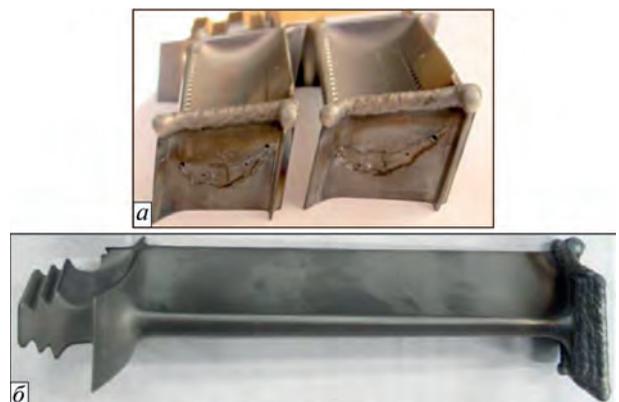


Рис. 1. Зовнішній вигляд відновлених бандажованих робочих лопаток сучасних авіаційних ГТД [3]: а – робочі лопатки турбіни високого тиску, сплав ЖС32-ВИ; б – робочі лопатки турбіни середнього тиску, сплав ЖС26-ВИ

Яровицин О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9922-3877>, Черв'яков М.О. <https://orcid.org/0000-0003-4440-7665>, Наконечний О.О. <https://orcid.org/0000-0002-6098-0413>, Фомакін О.О. <https://orcid.org/0000-0001-8903-3340>, Воронін С.О. <https://orcid.org/0009-0003-3360-2710>, Явдощина О.Ф. <https://orcid.org/0000-0002-8587-7295>
© О.В. Яровицин, М.О. Черв'яков, О.О. Наконечний, О.О. Фомакін, С.О. Воронін, О.Ф. Явдощина, 2024

Таблиця 1. Вміст основних легуючих елементів у нікелевих жароміцних сплавах

Сплав	Вар. %					
	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti
ЖС26-ВИ	0,12...0,18	4,3...5,3	Основа	8,7...9,3	5,6...6,1	0,8...1,2
ЖС32-ВИ	0,12...0,17	4,3...5,3	«-»	9,0...9,5	5,7...6,2	-
ВЖЛ12У	0,14...0,19	9,0...10,0	«-»	13,5...14,5	5,1...5,7	4,2...4,7
ЧС40	≤ 0,05	19,0...21,0	«-»	-	2,4...2,7	-

Закінчення табл. 1

Сплав	Вар. %							
	Mo	W	Nb	Ta	Re	V	Fe	Si, Mn
ЖС26-ВИ	0,8...1,4	10,9...12,5	1,4...1,8	-	-	0,8...1,2	≤ 0,5	≤ 0,3
ЖС32-ВИ	0,9...1,3	8,1...8,9	1,4...1,8	3,7...4,7	3,6...4,3	-	≤ 0,5	≤ 0,2
ВЖЛ12У	2,7...3,4	1,0...1,8	0,5...1,0	-	-	0,5...1,0	≤ 1,0	≤ 0,2
ЧС40	8,0...10,0	4,5...5,5	-	-	-	-	≤ 5,0	≤ 0,3

вмістом зміцнюючої γ' -фази вимагають створення окремих підходів для оцінки високотемпературної довготривалої міцності зазначених зварних з'єднань. Подібних публікацій інших авторів при підготовці даної статті не виявлено.

Огляд відомих стандартів на механічні випробування [7, 8] та їх аналіз [9] показують, що в них регламентуються параметри робочої ділянки зразка, а вказівки з форми і розмірів його захватної частини носять лише рекомендований характер. Витрати матеріалу на виготовлення зразка для механічних випробувань залежать від його геометричних розмірів (довжини робочої ділянки та габаритів захватної частини), а також – від необхідних припусків на його механічну обробку. Але незалежно від виду зразка для механічних випробувань (плоский, циліндричний) можна констатувати, що необхідність формоутворення його захватної частини при виготовленні значним чином збільшує габаритні розміри як безпосередньо зразка, так і відповідної вихідної заготовки.

Основними проблемами, що значно ускладнюють використання стандартних методик підготовки зварних заготовок та виготовлення з них зразків для зварного з'єднання «основний-наплавлений метал» НЖС, що імітує умови відновлення робочих лопаток авіаційних ГТД, є наступні:

1. Обмежена деформаційна здатність наплавленого металу НЖС з вмістом зміцнюючої γ' -фази більше 50 об'ємних % у стані безпосередньо після наплавлення (наприклад, за [10–12] $\epsilon_{1000^\circ\text{C}} \leq 0,7\%$) та висока схильність литого основного металу до утворення тріщин при зварюванні плавленням. Це, в свою чергу, перешкоджає виконанню бездефектного наплавлення об'ємом більше 2...3 см³ [12] через збільшення кількості тепловкладень у виріб за складовими ефективною тепловою потужності дуги та погонної енергії [13, 14].

2. Висока вартість заготовок основного металу та спеціалізованих присадних матеріалів НЖС,

необхідність їх виготовлення за індивідуальним замовленням.

3. Ускладнена механічна оброблюваність НЖС [15].

Метою даної роботи є розробка методики високотемпературних випробувань на довготривалу міцність зразків з мікроплазмовим порошковим наплавленням робочих лопаток авіаційних ГТД з важкозварюваних НЖС.

Найважчий попередній позитивний досвід застосування мініатюрних плоских пропорційних зразків для випробувань на статичний розтяг при високій температурі на сервогідроліній машині MTS-810 в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [9]. Він полягає у значному зменшенні габаритів захватної частини плоского зразка для механічних випробувань, та відповідно – об'єму, необхідного для його виготовлення зварної заготовки з НЖС, за рахунок застосування захватів-перехідників типу «ластівчин хвіст». В свою чергу, актуальними задачами в рамках розробки нової методики випробувань на високотемпературну довготривалу міцність були: розробка типового зразка та захватів-перехідників для випробувальної машини МП-3Г, а також – форми, розмірів, режимів наплавлення вихідної зварної заготовки, що гарантує її отримання без утворення тріщин.

Розробка методики досліджень. При попередньому аналізі для випробувань на високотемпературну міцність у якості вихідних прототипів було обрано 3 типи зразків. З плоского зразка, що використовується в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [16] і має захватну частину з отворами під штифт діаметром 8 мм запозичено форму робочої ділянки (довжина 25 мм, розрахунковий переріз 7,5...9,0 мм², рис. 2, а). Для уточнення необхідних геометричних характеристик захватної частини аналізувалися наступні циліндричні зразки-прототипи: діаметром 4×М6, 5×М8 та 6×М10 за ISO 6892-2:2011 [7] (рис. 2, б); близький до зразка МИ-83 [16] (рис. 2, в), що, як відомо, серійно використовується для випробувань НЖС ВЖЛ12У та ЖС6У на висо-

котемпературну довготривалу міцність. На даних зразках на основі [17] ідентифіковано геометричні характеристики поверхонь (рис. 2, б), які у різьбовому з'єднанні опираються найбільш небезпечним зусиллям зрізу [18] та змінанню: площа опору зусиллям зрізу S_{zp} та еквівалентний об'єм матеріалу V_{Σ} захватної частини зразка (табл. 2), що опирається змінанню. Визначені показники метричних різьб М6 та М8, спираючись на відомі принципи теорії подібності [19], конвертовано у необхідні розміри захватної частини плоских зразків типу

«ластівчин хвіст» (рис. 3, 4). Надалі для випробувальної машини МП-3Г виготовлено комплект спеціалізованої оснастки з НЖС ВЖЛ12У з отворами під штифт діаметром 6 мм (рис. 5), яка для встановлення плоских зразків із захватною частиною типу «ластівчин хвіст» передбачає використання проміжного захвату-перехідника.

Крім виконаних перевірочних розрахунків міцності захватної частини запропонованого зразка (див. рис. 4, а) на зріз та змінання додатково її працездатність перевірялася шляхом симуляції

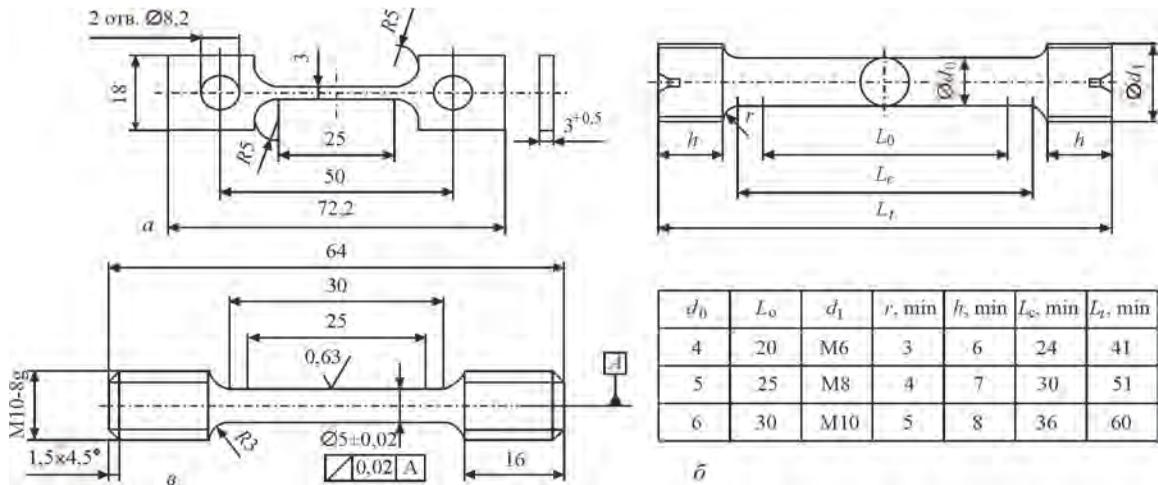


Рис. 2. Зразки-прототипи, використані для конструювання оптимізованого плоского пропорційного мініатюрного зразка під задачу випробувань зварного з'єднання «основний-наплавлений метал» НЖС на високотемпературну тривалу міцність: а – плоский пропорційний зразок ІЕЗ ім. С.О. Патона; б – циліндричний зразок за ISO 6892-2:2011 [7]; в – циліндричний зразок для випробувань НЖС ВЖЛ12У та ЖС6У

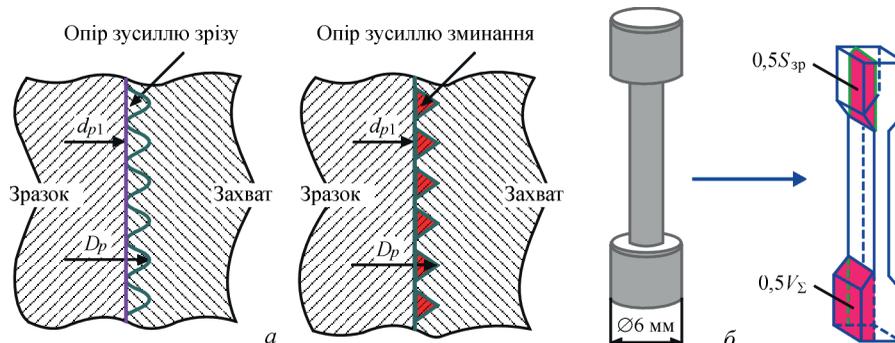


Рис. 3. Еквівалентні поверхні опору зусиллям зрізу та змінання для різьбового з'єднання зразка-прототипу (а) та схема їх конвертації в захватну частину оптимізованого плоского пропорційного зразка системи «ластівчин хвіст» (б)

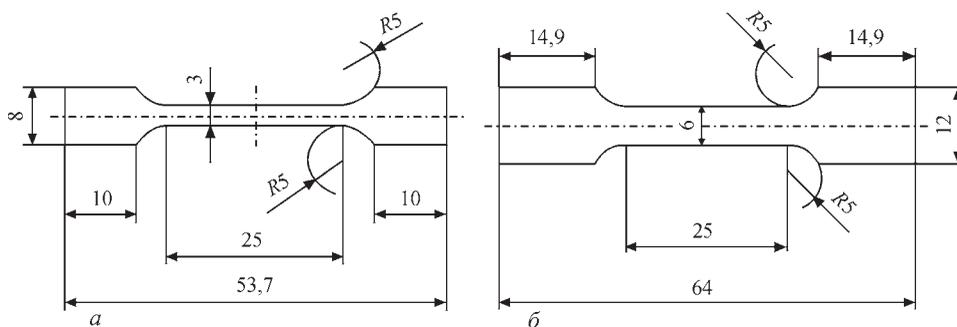


Рис. 4. Креслення розроблених оптимізованих мініатюрних плоских пропорційних зразків з захватом типу «ластівчин хвіст» для випробувань на високотемпературну тривалу міцність: а – з площею поперечного перерізу його робочої частини $S_0 = 9 \text{ мм}^2$; б – з площею поперечного перерізу його робочої частини $S_0 = 18 \text{ мм}^2$

Таблиця 2. Співвідношення базових геометричних параметрів циліндричних зразків діаметром 6×M10, 5×M8 та 4×M6 згідно ISO 6892-2:2011 з результатами розрахунків еквівалентних геометричних характеристик для плоских пропорційних зразків: S_0 – площа поперечного перерізу робочої ділянки зразка; S_{sp} – площа різьби, яка опирається в захваті зусиллям зрізу; V_{Σ} – еквівалентний об’єм матеріалу, що опирається в захваті зусиллям зминання та зрізу (в різьбі або плоскому пропорційному зразку)

Тип	Циліндричний зразок						Плоский пропорційний зразок		
	$S_0, \text{мм}^2$	Крок різьби $P, \text{мм}$	Середній діаметр різьби $d_2, \text{мм}$	Внутрішній діаметр різьби $d_1, \text{мм}$	Кількість витків $z, \text{шт.}$	$S_{sp}, \text{мм}^2$	$V_{\Sigma}, \text{мм}^3$	За рис. 4 а,	За рис. 4 б,
								$S_0 = 9 \text{мм}^2$	$S_0 = 18 \text{мм}^2$
діаметр 4×M6	12,56	1	5,35	4,92	12	154,47	69,87	74,0	–
								77,35*	34,93*
діаметр 5×M8	19,63	1,25	7,188	6,65	9	208,82	110,01	–	110,00
								104,41*	55,00*
діаметр 6×M10	28,26	1,5	9,026	8,38	8	263,14	176,81	–	–
								131,57*	88,41*

Примітка. *для половини об’єму різьбового з’єднання або захвату типу «ластівчин хвіст».

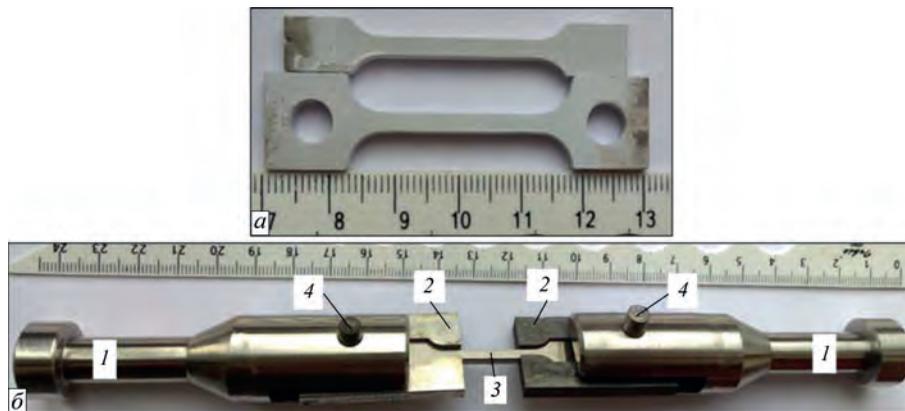


Рис. 5. Зовнішній вигляд оптимізованого плоского пропорційного в порівнянні зі зразком традиційної форми (а) та виготовлена збірка спеціалізованої оснастки для випробувальної машини МП-3Г (б). Позначення: 1 – основний захват; 2 – проміжний захват-перехідник; 3 – зразок для механічних випробувань; 4 – осі діаметром 6 мм

процесу статичного навантаження при температурі 1000 °C в програмному пакеті SOLIDWORKS Simulation 2015 відповідних 3D-моделей нового та стандартного зразка діаметром 4×M6 (рис. 5). При

цьому використовувалися довідкові дані з механічних характеристик матеріалу литого НЖС ЖС32-ВІ за [20]. Результати фізичного моделювання показали, що в запропонованому плоскому зразку

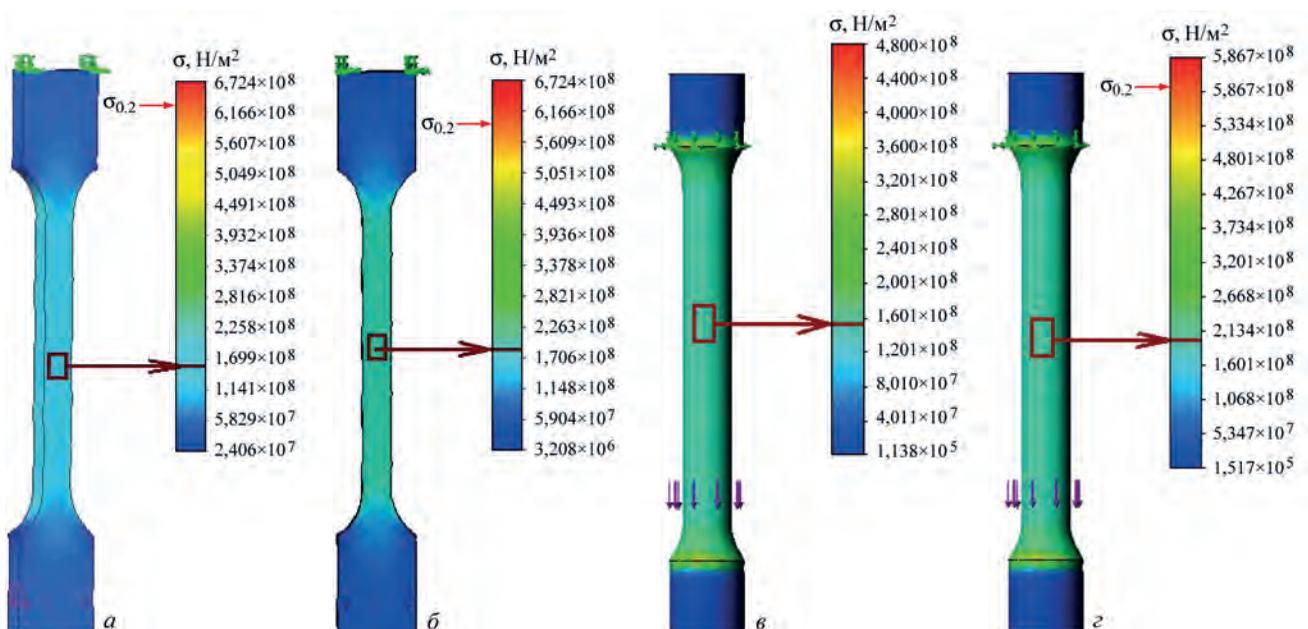


Рис. 6. Результати фізичного моделювання в програмному пакеті SOLIDWORKS Simulation 2015 3D-моделей нового (а, б) та зразка діаметром 4×M6 (в, з) з литого НЖС ЖС32-ВІ при 1000 °C

(див рис. 6, а, б) заданий рівень напружень 150 та 200 МПа безпосередньо реалізується на його робочій ділянці і ідентичний стандартному зразку діаметром 4×М6 (див рис. 5, в, г). В місцях переходу до захватної частини концентрації підвищених напружень не спостерігається.

Перевірка виготовленого комплекту оснастки для високотемпературних випробувань на довготривалу міцність зварних з'єднань важкозварюва-

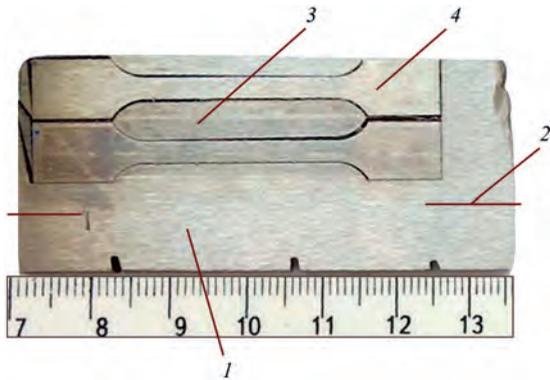


Рис. 7. Схема виготовлення оптимізованого плоского пропорційного зразка наплавленого металу для високотемпературних випробувань наплавленого металу: 1 – технологічна основа з аустенітної нержавіючої сталі; 2 – положення лінії сплавлення з наплавленим металом; 3 – наплавлений метал жаростійкого або жароміцного сплаву; 4 – оптимізований плоский пропорційний зразок

них жароміцних нікелевих сплавів здійснювалася кількома етапами при послідовному збільшенні температури випробувань та рівня жароміцності матеріалу. На першому етапі для зазначених випробувань багатошаровим наплавленням виготовлялася заготовка «вертикальна стінка», з якої після шліфування її бокових поверхонь електроерозійною різкою вирізалися оптимізовані плоскі пропорційні зразки (рис. 7). На другому етапі відпрацьовувалася підготовка зварної заготовки «50 % основного + 50 % наплавленого металу», з якої аналогічно вирізалися оптимізовані плоскі пропорційні зразки (рис. 8, 9).

Результати експериментів та їх аналіз. Умови та результати випробувань наплавленого металу ЧС40, шаруватого наплавленого металу ЖС32 + ЧС40, сформованого відповідно [21], та наплавленого металу ЖС32 представлено в табл. 3 (експерименти № 1–3). Вони підтвердили належну роботу виготовленого комплекту спеціалізованої оснастки для випробувальної машини МП-3Г: при $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $\sigma = 69\text{ кгс/мм}^2$ – витримка не менше 120 год; при $T = 975\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $\sigma = 7,5 \dots 10,0\text{ кгс/мм}^2$ – витримка орієнтовно 20 год. Наступним етапом дослідних робіт було відпрацювання форми і роз-

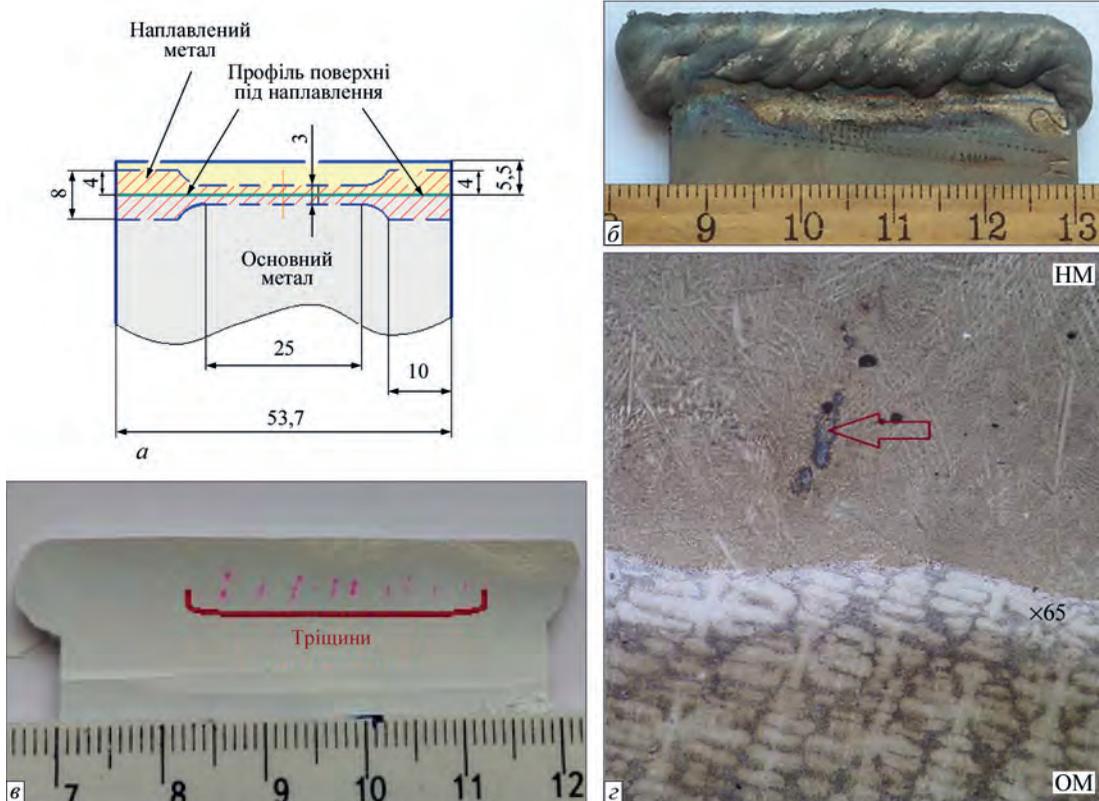


Рис. 8. Законіформності утворення тріщин в зварному з'єднанні «50 % основного (ОМ) + 50 % наплавленого (НМ) металу» НЖС типу ЖС32, виконаному одношаровим мікроплазмовим порошковим наплавленням сплаву ЖС32 з $q_{\mu} = 380 \dots 450\text{ Вт}$ та $q_{\mu}/v = 2000 \dots 3000\text{ Дж/мм}$: а – схема підготовки зварної заготовки та вирізки зразка для механічних випробувань; б – зовнішній вид одношарового наплавлення; в – результати капілярного контролю після видалення бокових підсилень наплавленого валика; г – зовнішній вид тріщин в наплавленому металі ЖС32, виявлених при металографічному контролі

мірів зварної заготовки для зварного з'єднання «50 % основного + 50 % наплавленого металу».

При використанні звичайного наплавлення сплаву ЖС32 на торець пластини з литого НЖС ЖС32-ВИ або ЖС26-ВИ для формування захватної частини плоского пропорційного зразка за рис. 4, а з боку наплавленого металу необхідно застосовувати одношарове наплавлення з висотою валика 6...7 мм (рис. 8, а, б). Але з'ясувалося, що такі режими мікроплазмового порошкового наплавлення на торець пластини товщиною 3,5...5,0 мм, які характеризуються діючим значенням зварювально-

го струму $I = 25...35$ А, ефективною тепловою потужністю $q_u = 350...450$ Вт та погонною енергією $q_u/v = 2000...3000$ Дж/мм, викликають утворення регулярних тріщин (рис. 8, в, г). За даними металографічного контролю 10 шліфів вони локалізуються в наплавленому металі. Їх поява пояснюється виникненням в процесі наплавлення розтягуючих деформацій, що перевищують попередньо встановлену обмежену деформаційну здатність наплавленого металу ЖС32 [11]. В свою чергу, з огляду на попередньо встановлену пряму пропорційність між величиною погонної енергії та по-

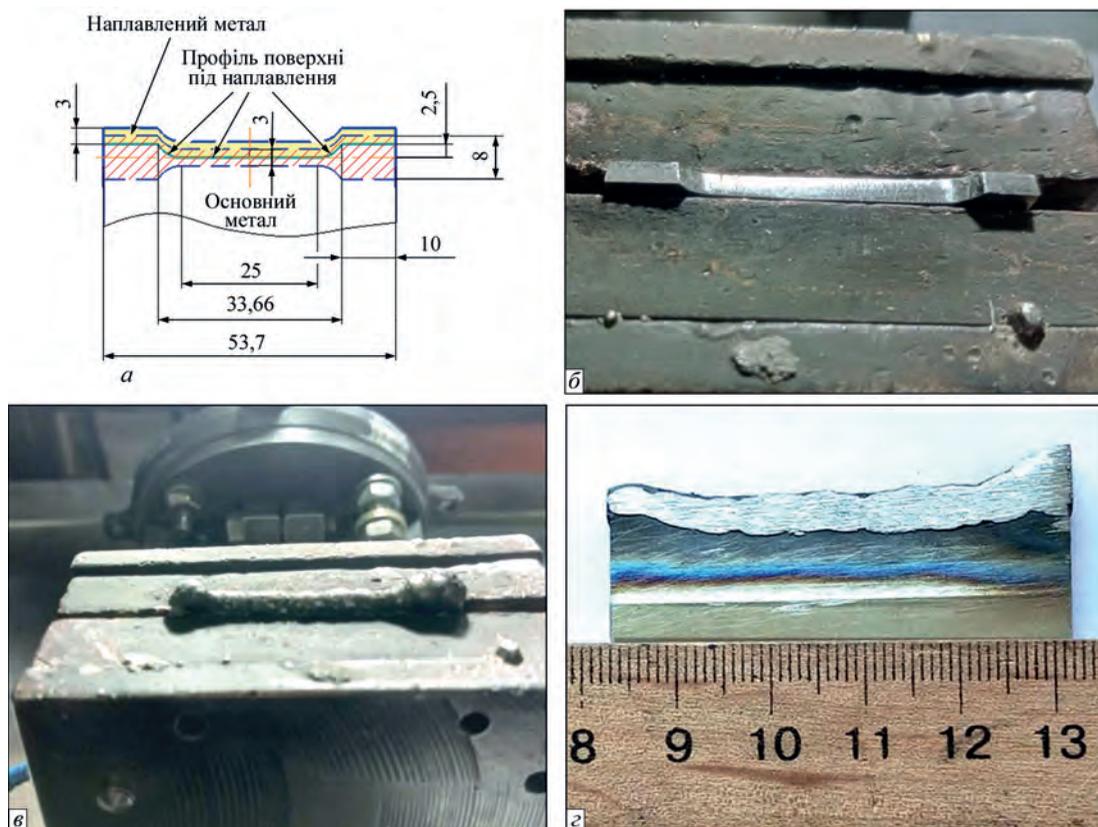


Рис. 9. Особливості підготовки поверхні та техніки наплавлення зварної заготовки для зварного з'єднання «50 % основного – 50 % наплавленого металу» НЖС: а – схема підготовки зварної заготовки та вирізки зразка для механічних випробувань; б – попереднє формування западини перед наплавленням; в – зовнішній вид одношарового наплавлення; г – зварна заготовка після часткового видалення бокових підсилень наплавленого валика

Таблиця 3. Результати випробувань на довготривалу міцність зразків зварних з'єднань мікроплазмовим порошковим наплавленням

Номер експеримента	Вид зразків	Тип зразка	Попередня термічна обробка зразка	$T, ^\circ\text{C}$	Навантаження σ , кгс/мм ²	Час витримки τ , год і хв
1	НМ ЧС40	за рис. 4, а	1050 °С – 2,5 год + 760 °С – 10 год + 650 °С – 25 год	550	69,0	120 год*
2	НМ ЖС32 + ЧС40 (Ш)	за рис. 4, б	1050 °С – 2,5 год	975	7,5	17 год 25 хв**
3	НМ ЖС32	за рис. 4, а	1050 °С – 2,5 год	975	10,0	10 год**
4	50 % ОМ ЖС32-ВИ + 50 % НМ ЖС32	за рис. 4, а	1050 °С – 2,5 год	1000	14,5	60 год**
5	50 % ОМ ЖС32-ВИ + 50 % НМ ЖС32	за рис. 4, а	1280 °С – 1,5 год	975	20,0	23 год 30 хв**
6	50 % ОМ ЖС26-ВИ + 50 % НМ ЖС32	за рис. 4, а	1265 °С – 1,5 год	975	20,0	44 год**

Примітка. *зразок знято без руйнування; **руйнування зразка по його робочій частині.

перечним перерізом наплавленого валика при мікроплазмовому порошковому наплавленні [14], їх поява може бути обумовлена збільшеними тепловкладеннями у виріб [13] через більший час існування зварювальної ванни при формуванні одношаровим наплавленням валика висотою 6...7 мм.

В той же час попереднє формування западини на поверхні торця пластини з НЖС по формі профілю робочої частини плоского пропорційного зразка (див. рис. 4, а, 9) дозволяє забезпечувати формування захватної частини з боку наплавленого металу при зниженій до 3...4 мм висоті наплавленого валика. Такі режими наплавлення порівняно з першим варіантом характеризуються погонною енергією $q_{\text{н}}/v = 1000...1500$ Дж/мм, що відповідно пояснюється формуванням значно меншого поперечного перерізу наплавленого валика [14]. Наступна термічна обробка такої зварної заготовки за режимами старіння 1050 °С – 2,5 год та гомогенізації (1265 °С – 1,5 год для основного металу сплаву ЖС26-ВИ або 1280 °С – 1,5 год для основного металу сплаву ЖС32-ВИ) проявів в ній схильності до утворення тріщин за результата-

ми капілярного та металографічного контролю не виявила. Типовий приклад якісної мікроструктури основного та наплавленого металу в районі лінії сплавлення представлено на рис. 10. Після виготовлення електроерозійною різкою зразків для випробувань на довготривалу міцність, окіл лінії сплавлення між основним та наплавленим металом ЖС32 достатньо рівномірно припадав на середину його робочої ділянки.

Згідно відпрацьованої методики (див. рис. 4, а, 9) виконано мікроплазмове порошкове наплавлення сплавом ЖС32 3-х зварних заготовок «50 % основного + 50 % наплавленого металу» та після проходження призначеної термічної обробки, додаткового шліфування, полірування поверхонь електроерозійних різів і капілярного контролю виготовлені електроерозійною різкою зразки випробувано на високотемпературну довготривалу міцність при 975 та 1000 °С. Результати випробувань представлено в табл. 3 (експерименти № 4...6). Їх інтерпретація з урахуванням попередньо отриманих в ІЕЗ ім. Є.О. Патона експериментальних даних [2] та опублікованих в роботах [6, 7] базо-

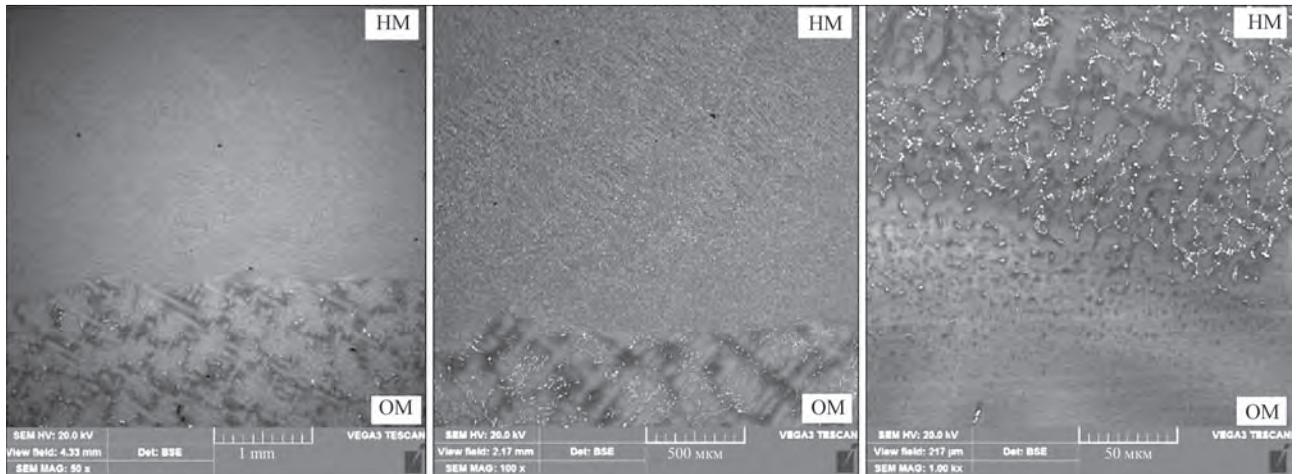


Рис. 10. Типовий приклад якісної мікроструктури зварного з'єднання «50 % основного (ОМ) + 50 % наплавленого (НМ) металу» сплаву ЖС32

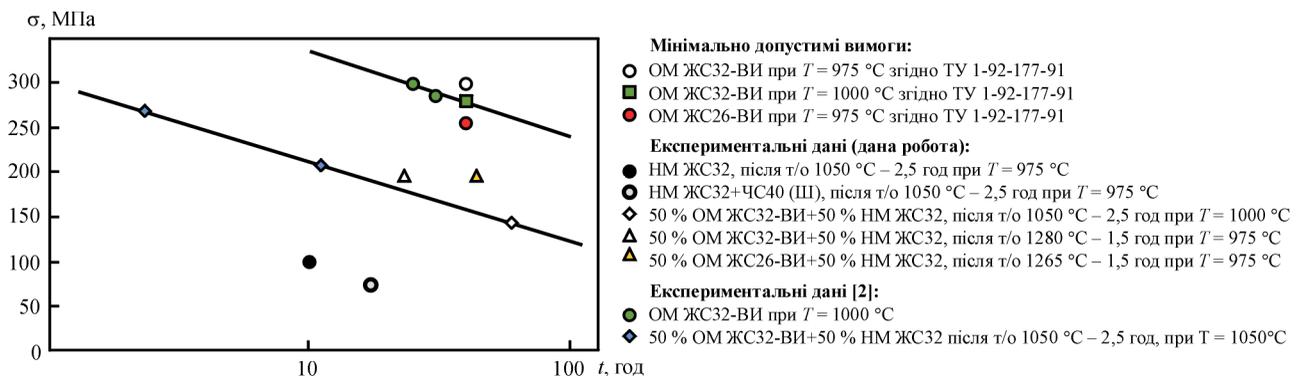


Рис. 11. Результати випробувань зразків основного металу (ОМ), наплавленого металу (НМ) та «50 % основного (ОМ) + 50 % наплавленого (НМ) металу» на тривалу міцність при температурах 975 та 1000 °С, отриманих мікроплазмовим порошковим наплавленням сплаву ЖС32, в порівнянні з вимогами діючої нормативно-технічної документації для литого металу ЖС32-ВИ та ЖС26-ВИ

вих вимог щодо мінімального рівня механічних властивостей литих НЖС ЖС32-ВИ та ЖС26-ВИ згідно ТУ 1-92-177-91 наведена на рис. 11.

Експериментальні дані випробувань на довготривалу міцність зразків «50 % основного + 50 % наплавленого металу» за участю наплавленого металу ЖС32, вирізаних вздовж лінії сплавлення з литим сплавом ЖС26-ВИ або ЖС32-ВИ, свідчать, що показники для базової довговічності 40 год відносно рівня відповідних вимог в діючих ТУ на литі сплави ЖС32-ВИ або ЖС26-ВИ [6, 7], становлять:

- для зразка «50 % основного (ЖС32-ВИ) + 50 % наплавленого (ЖС32) металу» після термічної обробки за режимом старіння 1050 °С – 2,5 год – орієнтовно 0,5 при 1000 °С;
- для зразка «50 % основного (ЖС32-ВИ) + 50 % наплавленого (ЖС32) металу» після термічної обробки за режимом гомогенізації 1280 °С – 1,5 год – орієнтовно 0,6 при 975 °С;
- для зразка «50 % основного (ЖС26-ВИ) + 50 % наплавленого (ЖС32) металу» після термічної обробки за режимом гомогенізації 1265 °С – 1,5 год – орієнтовно 0,77 при 975 °С.

Таким чином встановлено, що зварне з'єднання «основний–наплавлений метал» з висотою наплавленого шару сплаву ЖС32 до 3 мм у зоні лінії сплавлення має достатньо високі показники довготривалої міцності – на рівні 0,5...0,6 при температурах 975 та 1000 °С відносно мінімальних вимог для литого сплаву ЖС32-ВИ; на рівні 0,77 при температурі 975 °С для литого сплаву ЖС26-ВИ. Для працездатності відновлених ущільнюючих елементів робочих лопаток турбіни високого та середнього тиску (торці бандажних полиць та верхня кромка пера) із НЖС ЖС32-ВИ та ЖС26-ВИ досягається достатній рівень довготривалої міцності при температурах 975 та 1000 °С, що підтверджено практикою тривалої експлуатації відновлених робочих лопаток на сучасних авіаційних ГТД [1–4].

Аналіз отриманих авторами статті експериментальних даних та матеріалів попередньо опублікованої роботи [22] дозволяє прогнозувати наявність значного зниження показників високотемпературної довготривалої міцності в першу чергу саме для наплавленого металу ЖС32 порівняно з високотемпературною ділянкою зони термічного впливу литих жароміцних сплавів ЖС32-ВИ і ЖС26-ВИ. Припускається, що таке зниження довготривалої міцності наплавленого металу ЖС32 може бути обумовлено відмінними умовами його формування порівняно з серійною технологією лит-

тя НЖС з направленою кристалізацією, зокрема значною різницею (щонайменше на порядок [11]) у швидкостях охолодження в районі температурного інтервалу кристалізації сплавів ЖС32-ВИ і ЖС26-ВИ, яке в свою чергу істотно впливає на характеристики дендритної структури при кристалізації (див. рис. 10), а саме параметр відстані між осями дендритів. Безпосередні причини зниження властивості довготривалої міцності саме наплавленого металу ЖС32 при температурах 975 та 1000 °С потребують подальших досліджень.

Висновки

1. Розроблено методику високотемпературних випробувань на довготривалу міцність зварних з'єднань «основний–наплавлений метал» з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32, що базується на застосуванні оптимізованих мініатюрних плоских зразків з перерізом робочої частини 7,5...9,0 мм² із захватною частиною типу «ластівчин хвіст» та проміжних захватів-перехідників. При цьому за умови однакової товщини зварної заготовки витрати матеріалу порівняно із плоским зразком-прототипом зменшуються у 2...3 рази.

2. Для наплавленого металу нікелевих високожароміцних сплавів, що має обмежену деформаційну здатність в процесі багатошарового наплавлення, запропонована методика дозволяє отримувати зразки без дефектів та гарантує високу достовірність відповідних експериментальних даних.

3. Запропоновано, з метою запобігання утворенню тріщин, при підготовці зварної заготовки «50 % основного + 50 % наплавленого металу» високожароміцного нікелевого сплаву, попередньо виконувати на торцевій поверхні пластини товщиною 3,5...5,0 мм виборку-заглиблення на 2,5...3,0 мм. Це дозволяє обмежувати висоту наплавленого валика до 3...4 мм і, за рахунок зменшення його поперечного перерізу та кількості наплавленого матеріалу, обмежувати при ефективній потужності мікроплазмової дуги 350...450 Вт її погонну енергію до 1000...1500 Дж/мм шляхом збільшення швидкості мікроплазмового порошкового наплавлення.

4. Апробацію розробленої методики проведено при випробуванні зразків наплавленого металу та зразків «основний–наплавлений метал» вздовж лінії сплавлення: при 550 °С – на базі 100 год; при 975 та 1000 °С – на базі 40 год.

5. Встановлено, що зварне з'єднання «основний–наплавлений метал» за участю наплавленого металу ЖС32, що також включає високотемпературну ділянку зони термічного впливу

основного металу, має наступні показники довготривалої міцності на базі 40 год порівняно з мінімально допустимими за ТУ для литого нікелевого жароміцного сплаву: на рівні 0,5...0,6 при температурах 975 та 1000 °С відносно литого сплаву ЖС32-ВИ; на рівні 0,77 при температурі 975 °С відносно литого сплаву ЖС26-ВИ.

6. Працездатність зварного з'єднання «основний–наплавлений метал» НЖС типу ЖС32 при визначеному в даній роботі рівні довготривалої міцності підтверджено практикою експлуатації протягом заданого міжремонтного періоду великої кількості моторокомплектів робочих лопаток турбіни високого та середнього тиску сучасних авіаційних ГТД, відновлених українською авіаційною промисловістю з 2005 р.

Список літератури

1. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Калашников Г.П. и др. (2005) Ремонт изношенных в процессе эксплуатации элементов конструкции бандажных полок литых рабочих лопаток турбины из сплавов типа ЖС. *Авиационно-космическая техника и технология*, **9** (25), 221–223.
2. Ющенко К.А., Савченко В.С., Яровицын А.В. и др. (2010) Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки. *Автомат. сварка*, **8**, 25–29.
3. Жеманюк П.Д., Петрик И.А., Чигилейчик С.Л. (2015) Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. *Автомат. сварка*, **8**, 43–46.
4. Ющенко К.А., Яровицын О.В., Хрущов Г.Д. и др. (2022) Дослідження та оптимізація серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням. *Космічна наука і технологія*, **3**(28), 3–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.01-01>
5. Жеманюк П.Д., Клочихин В.В., Лысенко Н.А., Наумик В.В. (2015) Структура и свойства литых лопаток авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ после горячего изостатического прессования. *Вестник авиастроения*, **1**, 139–146.
6. Милонин Е.В., Лысенко Н.А., Наумик В.В. (2016) Направленная кристаллизация литых изделий из опытного жаропрочного сплава на базе ЖС32-ВИ. *Авиационно-космическая техника и технология*, **8**, 83–89.
7. ISO 6892-2:2011 (E). *Metallic materials – Tensile testing – Part 2: Method of test at elevated temperature*. ISO copyright office, 2011.
8. EN ISO 204-2018 *Metallic materials – Uniaxial creep testing in tension – Method of test*. ISO copyright office, 2018.
9. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. и др. (2019) Оценка кратковременных механических свойств соединения трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6. *Автомат. сварка*, **7**, 38–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.07>
10. Ющенко К.А., Звягінцева Г.В., Яровицын О.В. та ін. (2019) Нові підходи в оцінці механічних характеристик та мікроструктури відновлених деталей ГТД із нікелевих жароміцних сплавів. *Металофізика та новітні технології*, **10**(41), 1345–1364. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345>
11. Яровицын О.В. (2020) Оцінка деформаційної здатності наплавленого металу нікелевих жароміцних сплавів з високим вмістом γ' -фази. *Металознавство та обробка металів*, **26**(94), 38–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.38>
12. Ющенко К.А., Яровицын О.В., Наконечный О.О. та ін. (2020) Розробка технології відновлення сектора соплових лопаток з важкозварюваного нікелевого жароміцного сплаву типу ЖС6 мікроплазмовим порошковим наплавленням. *Автомат. зварювання*, **11**, 27–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2020.11.05>
13. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. (2017) Влияние энергетических показателей режимов на склонность к образованию трещин при микроплазменной порошковой наплавке никелевого сплава ЖС32. *Автомат. сварка*, **2**, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.02.01>
14. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. (2016) Закономерности дискретно-аддитивного формирования микрообъемов кристаллизующегося металла при многослойной микроплазменной порошковой наплавке никелевых сплавов. *Автомат. сварка*, **5-6**, 154–161. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.06.25>
15. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. (2003) *Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. Монография*. Запорожье, ОАО «Мотор Сич».
16. (1978) *Каталог образцов для испытаний металлов*. ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР.
17. ДСТУ ISO 724:2005 *Нарізі метричні ISO загального призначення. Основні розміри (ISO 724:1993, IDT)*, 2007.
18. Биргер И.А., Шор Б.Ф., Иосилевич Г.Б. (1979) *Расчет на прочность деталей машин. Справочник. 3-е издание*. Москва, Машиностроение.
19. Гухман А.А. (1973) *Введение в теорию подобия*. Москва, Машиностроение.
20. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Конакова И.П. (2010) *Структура и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ. Справочник*. Екатеринбург, Квист.
21. Ющенко К.А., Яровицын О.В., Наконечный О.О. та ін. (2023) *Спосіб мікроплазмового порошкового 3D-наплавлення деталей з нікелевих жароміцних сплавів*. Патент UA 127421. Опубл. 16.08.2023.
22. Ющенко К.А., Яровицын О.В., Червяков М.О. та ін. (2022) Формування комплексу вимог до методик оцінювання роботоздатності зварних з'єднань «основний–наплавлений метал» нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС6 і ЖС32, що імітують відновлення кромок лопаток авіаційних ГТД в промислових умовах. *Металофізика та новітні технології*, **12**(44), 1679–1696. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.12.1679>

References

1. Peychev, G.I., Zamkovoy, V.E., Kalashnikov, G.P. et al. (2005) Repair of structural elements worn out in the process of operation of the truss shelves of cast working blades of the turbine made of alloys of the ZS type. *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, **9**(25), 221–223 [in Russian].
2. Yushchenko, K.A., Savchenko, V.S., Yarovytsyn, A.V. et al. (2010) Development of the technology for repair microplasma powder cladding of flange platform faces of aircraft engine high-pressure turbine blades. *The Paton Welding J.*, **8**, 21–24.
3. Zhemanyuk, P.D., Petrik, I.A., Chigilejchik, S.L. (2015) Experience of introduction of the technology of reconditioning microplasma powder surfacing at repair of high-pressure turbine blades in batch production. *The Paton Welding J.*, **8**, 43–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.08.08>
4. Yushchenko, K. A., Yarovytsyn, O. V., Khrushchov, G. D. et al. (2022) Research and optimization of refurbishment of HPT blades of the D-18T aircraft gas turbine engine by microplasma powder welding. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, **3**(28), 3–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.01-01> [in Ukrainian].
5. Zhemanyuk, P., Klochyhyn, V., Lysenko, N., Naumyk, V. (2015) Structure and properties of cast aircraft engines blades (HA26-VI alloy) from heatproof nickeliferous alloy after hot isostatic pressing. *Vestnik Dvigatellestroeniya*, **1**, 139–146 [in Russian].

6. Milonin, E. V., Lysenko, N. A., Naumyk, V. V. (2016) Directional solidification cast products of experienced superalloy base HA32-VI, *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, 8, 83-89 [in Russian].
7. (2011) ISO 6892-2:2011 (E) *Metallic materials – Tensile testing – Pt 2: Method of test at elevated temperature*.
8. (2018) EN ISO 204-2018 *Metallic materials – Uniaxial creep testing in tension – Method of test*.
9. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, A.V., Chervyakov, N.O. et al. (2019) Evaluation of short-term mechanical properties of a joint of difficult-to-weld nickel high-temperature alloys of ZhS6 type. *The Paton Welding J.*, 7, 29-35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.07.07>
10. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Chervyakov, M. O. et al. (2019) New approaches in evaluation of mechanical characteristics and microstructure of restored parts of GTE from nickel heat-resistant alloys. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 10(41), 1345-1364. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345> [in Ukrainian].
11. Yarovytsyn, O.V. (2020) About the deformation ability of overlay metal of nickel-base difficult to weld high temperature strength alloys with γ' -phase strengthening high content. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 26(94), 38-48. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.38> [in Ukrainian].
12. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Nakonechnyi, O.O. et al. (2020) Development of the technology of reconditioning the sealing element of nozzle blade sector from difficult-to-weld high-temperature nickel alloy of ZhS6 type by microplasma powder surfacing. *The Paton Welding J.*, 11, 25-28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.11.05>
13. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, A.V., Chervyakov, N.O. (2017) Effect of energy parameters of microplasma powder surfacing modes on susceptibility of nickel alloy ZhS32 to crack formation. *The Paton Welding J.*, 2, 2-6. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2017.02.01>
14. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, A.V., Chervyakov, N.O. (2016) Dependencies of discrete-additive formation of microvolumes of metal being solidified in multi-layer microplasma powder surfacing of nickel alloys. *The Paton Welding J.*, B, 143-149. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2016.06.25>
15. Bohuslaev, V.A., Muravchenko, V.M., Zhemanyuk, P.D. et al. (2003) Technological support of service characteristics of GTE parts. In: *Turbine blades. Pt. 2*. Zaporozhie: OJSC Motor Sich Publish. House, [in Russian].
16. (1978) *Metal Test Specimen Catalog*. PWI of the Academy of Sci. of the Ukr.SSR [in Russian]
17. DSTU ISO 724:2005 ISO *Metric threads of general purpose. Basic dimensions* (ISO 724:1993, IDT), 2007 [in Ukrainian].
18. Birger, I.A., Shor, B.F., Iosilevich, G.B. (1979) *Strength calculation of machine parts: Refer. book. 3rd ed.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
19. Gukhman, A. A. (1973) *Introduction to the theory of similarity*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
20. Kuznetsov, V.P., Lesnikov, V.P., Konakova, I.P. (2010) *Structure and properties of heat-resistant nickel alloy ZhS32-VI: Refer. book*. Ekaterinburg, Kvist [in Russian].
21. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Nakonechnyi, O.O., Khrushchov G.D. et al. *The method of microplasma powder 3D deposition of parts made of nickel-based superalloys*. Patent UA 127421, B23K 10/02, B23K9/04, B23K9/23, B23K6/00, Publ. 16.08.2023 [in Ukrainian].
22. Yushchenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Chervyakov, M. O. (2022) Development of a set of requirements of methods for evaluating the performance of welded joints “base-overlay metal” from nickel-based superalloys of ZhS6 and ZhS32 type, simulating the repairing of the aircraft gas turbine engines blade edges under industrial conditions. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 12(44), 1679-1696. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.12.1679> [in Ukrainian]

HIGH-TEMPERATURE CREEP TESTING OF DIFFICULT-TO-WELD NICKEL-BASED SUPERALLOY SAMPLES WITH MICRO-PLASMA POWDER DEPOSITION

O.V. Yarovytsyn, M.O. Chervyakov, O.O. Nakonechnyi, O.O. Fomakin, S.O. Voronin, O.F. Yavdoshchyna

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: yarovytsyn@gmail.com

The procedure of high-temperature uniaxial creep testing for welded joints of “base-deposited metal” made of difficult-to-weld nickel-based superalloys of ZhS32 type, containing more than 60 vol. % of the strengthening γ' -phase, has been developed. It allows using witness samples to estimate the creep strength level at temperatures of 975 and 1000°C for the conditions of restoration of the edges of serial blades of modern aircraft gas turbine engines by micro-plasma powder welding deposition process. Its development took into account the need to go to larger sizes and, accordingly, the higher restraint conditions of the welded workpieces for manufacture of samples for mechanical tests, compared to typical conditions of serial restoration of the blade edge in industry, and some methods for hot cracks prevention were also proposed. Its feature is the use of “dovetail” type grips for samples with the working part of 7.5-9.0 mm², which allows significantly reducing their size. The proposed approach of choosing the shape and dimensions of the sample, the technique of preparing and forming the welded workpieces necessary for it by micro-plasma powder deposition allows significantly reducing the heat input, bringing the deposition modes of the witness samples closer to the industrial modes of serial restoration of the edges of blades of aircraft gas turbine engines. Due to that, it was possible to avoid the known manifestations of the tendency to crack formation during the deposition process and post weld heat treatment in the welded joints of the “base-deposited metal” of the nickel-based superalloys with directional crystallization, which are the workpieces for subsequent production of such witness samples. The developed procedure was tested to evaluate the creep strength of ZhS32 deposited metal samples and “50% base (ZhS26-VI or Zh32-VI) + 50% deposited (ZhS32) metal” samples at 975°C and 1000°C on the base of 40 hours holding and comparison of the relevant experimental data with the technical condition requirements for these cast nickel-based superalloys. 22 Ref., 3 Tabl., 11 Fig.

Keywords: micro-plasma powder welding deposition, welded joint of “base-deposited metal”, difficult-to-weld nickel-based superalloys, creep strength

Отримано 04.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 18.05.2024

Прийнято 08.07.2024