

PACS numbers: 06.60.Vz, 68.35.bd, 68.35.Gy, 68.37.Hk, 81.20.Vj, 81.40.Jj, 81.40.Np

**Формування комплексу вимог до методик оцінювання  
роботоздатності зварних з'єднань «основний–натоплений  
метал» ніклевих жароміцних стопів типу ЖС6 і ЖС32,  
що імітують відновлення кромки лопаток авіаційних ГТД  
в промислових умовах**

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

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

Наведено результати досліджень мікроструктури та механічних властивостей зварних з'єднань «основний–натоплений метал» ніклевих жароміцних стопів ЖС6 і ЖС32 із вмістом зміцнювальної  $\gamma'$ -фази орієнтовно у 60 об.%, одержаних мікроплазмовим порошковим натопленням, і порівняно їх з аналогічними опублікованими ФГУП «ВИАМ» ГНЦ рф даними стосовно натопленого металу ЖС32, одержаного способом селективного лазерного стоплення. Встановлено, що механічні властивості натопленого металу типу ЖС6У і ЖС32 характеризуються низькопластичним станом за температури у 1000°C, який пов'язується з відмінностями будови дендритної структури (відстань між осями, розподіл карбідної фази) порівняно з серійним литим стопом. Дані відмінності, в свою чергу, задаються для кожного процесу одержання такого матеріалу типовою швидкістю охолодження в інтервалі температур ліквідус–1200°C. Розглянуто основ-

---

Corresponding author: Oleksandr Valentynovych Yarovytsyn  
E-mail: yarovytsyn@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, O. V. Yarovytsyn, M. O. Chervyakov, H. V. Zviagintseva, I. R. Volosatov, and Yu. V. Oliynyk, Development of a Set of Requirements for 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, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 12: 1679–1696 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.12.1679](https://doi.org/10.15407/mfint.44.12.1679)

ні випадки формування тріщин у натопленому металі ЖС32. Показано, що за швидкості охолодження в зазначеному температурному інтервалі 15–50°C/с й за об'єму натоплення до 2–5 см<sup>3</sup> відповідний натоплений метал ЖС32 через мікроплазмове порошкове натоплення формується без утворення тріщин і має достатній для практичного застосування рівень високотемпературної короткочасної та тривалої міцності. Встановлено, що низькопластичний стан саме натопленого металу ніклевих жароміцних стопів ЖС6 і ЖС32 визначає високотемпературні властивості відповідних зварних з'єднань в цілому. Одержані результати свідчать про доцільність включення до комплексу атестаційних випробувань механічних властивостей зварних з'єднань «основний–натоплений метал» ніклевих жароміцних стопів із вмістом зміцнювальної  $\gamma'$ -фази більше 50 об.%, що застосовуються для відновлення пошкоджених кромek лопаток сучасних авіаційних газотурбінних двигунів, високотемпературних випробувань на статичну міцність натопленого металу.

**Ключові слова:** ніклеві жароміцні стопи, мікроплазмове порошкове натоплення, натоплений метал, мікроструктура, низькопластичний стан, короткочасні механічні властивості, тривала міцність.

During the microplasma powdered overlaying welding process (MPOW), the special type of overlay metal structure difficult-to-weld Ni-based superalloys ZhS6- and ZhS32-type is formed, which differs from similar cast by dendritic structure grinding, reduction of carbide particle size and more uniform distribution. Numerous metallographic studies conducted by Paton EWI, SE 'Ivchenko-Progress', JSC 'Motor-Sich' for the corresponding welded joints of alloy ZhS32 with a volume of overlay metal up to 2–5 cm<sup>3</sup> showed no tendency to crack at all stages of repair technology. The operability of such welded joints of the alloy ZhS32 in the conditions of long operation of the restored working blades at 950–1100°C is repeatedly checked in practice. An important component at the stage of pre-production preparation of repair technology based on the MPOW process is to perform comparative certification tests of mechanical properties (short-term and long-term strengths) of the respective welded joints in volumes equivalent to the requirements of technical conditions for cast superalloys. Suitable welded preparations for the subsequent cutting of samples for mechanical tests are made by multilayer overlaying. However, an increase in its volume of more than 2–5 cm<sup>3</sup> for nickel-based superalloys of ZhS6 and ZhS32 type is accompanied by a significant increase in the tendency to crack. To find out the reasons for their formation, a comprehensive study of the microstructure of these welded joints 'base–overlay metal' (by means of the scanning electron microscopy) and evaluation of their short-term and long-term strengths at  $T = 1000^\circ\text{C}$  is made. Results of study of the microstructure and mechanical properties of welded joints 'base–overlay metal' nickel-based superalloy ZhS32 obtained by MPOW process are compared with similar published data on the overlay metal ZhS32 obtained by the method selective laser sintering (SLS). For interpretation of results of the tendency to cracking formation during multilayer overlay of nickel-based superalloys with a content of strengthening  $\gamma'$ -phase with 60 vol.%, the results of metallographic studies of ZhS32 overlay metal obtained by electro-spark process are also used. The results of the performed research testify to

the prospects of including in the complex of certification tests the mechanical properties of welded joints of nickel-based superalloys with the content of strengthening  $\gamma'$ -phase more than 50 vol.% of high-temperature tests for static strength of the overlay metal. This will allow detecting violations of technological strength or low plasticity of their local areas before more expensive and complex tests (long-term strength, low- and high-cycle fatigue, fatigue crack growth rate) and further more adequately interpret their results.

**Key words:** nickel-based superalloys, microplasma powder overlay welding process, overlay metal, microstructure, low-plastic state, short- and long-term mechanical properties.

*(Отримано 29 вересня 2022 р.)*

## 1. ВСТУП

Не зважаючи на розробку і впровадження нових жароміцних нікелевих стопів на пострадянському просторі, в значних об'ємах виробляються або залишаються в експлуатації робочі та соплові лопатки з нікелевих жароміцних стопів (НЖС) типу ЖС32 та ЖС6У,-Ж. Дані матеріали вважаються важкозварюваними [1, 2]. Вони розраховані на експлуатацію в деталях сучасних авіаційних газотурбінних двигунів в діапазоні робочих температур від 950 до 1100°C (в залежності від виду деталю, наявності й типу її конструктивного охолодження), мають вміст зміцнювальної  $\gamma'$ -фази більше 50% об. [3]. Відповідно, протягом багатьох років залишається актуальною задача відновлення експлуатаційних пошкоджень таких деталей шляхом застосування зварювання топленням, зокрема із використанням присадного матеріалу рівноцінного рівня жароміцності.

Близько 15 років тому в Інституті електрозварювання НАН України був розроблений процес мікроплазмового порошкового натоплення (МПН) нікелевих жароміцних стопів, який було впроваджено у промисловість для відновлення робочих лопаток авіаційного двигуна Д-18Т стопом ЖС32 [4]. Найбільших обсягів практичного застосування серед українських авіаремонтних підприємств цей процес набув на АТ «Мотор Січ» [5]. Ряд нещодавніх публікацій [5–9] свідчить про поступове освоєння мікроплазмовим процесом багатопшарового натоплення з використанням у якості присадного матеріалу жароміцних нікелевих стопів типу ЖС32 та ЖС6.

Паралельно у зазначений період у ФГУП «ВИАМ» ГНЦ рф проводилися технологічні дослідження з освоєння даних присадних матеріалів для адитивних технологій на базі селективного лазерного стоплення (СЛС) [10–12], де виріб представляє собою багатопшаровий натоплений метал. Інтерес до освоєння подібних матеріалів процесом СЛС спостерігається також і у західних країнах [13].

Наведені вище матеріали свідчать, що на Заході й у країнах по-

страдянського простору проводяться систематичні науково-дослідні роботи з вивчення особливостей мікроструктури зварних з'єднань та нагрітого металу НЖС типу ЖС6 та ЖС32. З огляду на одержані за останні 5–10 років результати, актуальною є проблема оцінки роботоздатності таких зварних з'єднань та формування спеціалізованих підходів до їх механічних випробувань.

Метою даної роботи було підтвердження пріоритетності впливу структури нагрітого металу на формування низькопластичного стану зварного з'єднання «основний–нагрітий метал» НЖС ЖС6 та ЖС32, одержаного способом МПН, і з огляду на цей факт — внесення обґрунтованих пропозицій до побудови методик оцінки механічних властивостей, що імітують відновлення кромки лопаток сучасних авіаційних ГТД в промислових умовах способом МПН, в обсягах випробувань, еквівалентних промисловим технічним умовам на литий НЖС.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методика представлених в даній роботі досліджень поєднувала металографічні дослідження та оцінку механічних властивостей типових зон зварного з'єднання «основний–нагрітий метал» важкозварюваних ніклевих жароміцних стопів ЖС6К та ЖС32, одержаних способом МПН. Металографічні дослідження проводилися на растровому електронному мікроскопі зі збільшенням до  $\times 5000$ . Аналізувались як повздовжні перерізи зазначених зварних з'єднань в типових їх зонах (основний, нагрітий метал і зона термічного впливу), так морфологія зламів зразків після випробувань на статичний розтяг за температури  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Одержані в ІЕЗ ім. Є. О. Патона результати з дослідження мікро-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Основні легувальні елементи ніклевих жароміцних стопів ЖС32-ВИ, ЖС6У-ВИ, ЖС6К-ВИ.

**TABLE 1.** Basic alloying elements of ZhS32-VI, ZhS6U-VI, ZhS6K-VI nickel-based superalloys.

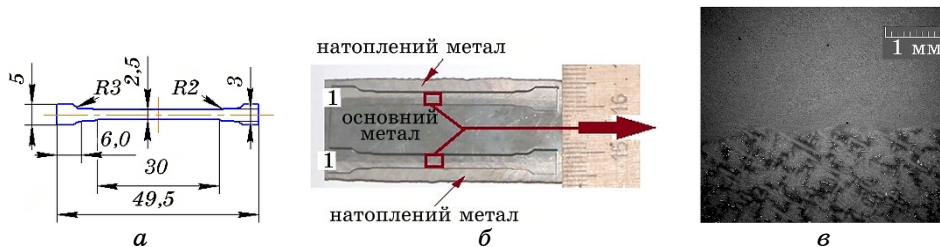
Стоп	% ваг.											
	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Fe	Mn	Si
ЖС32-ВИ	0,12–0,18	4,3–5,6	Осн. 10,0	8,0–10,0	5,6–6,3	–	0,8–1,4	7,8–9,5	1,4–1,8	3,5–4,5	3,5–4,5	<1,0
ЖС6У-ВИ	0,13–0,20	8,0–9,5	Осн. 10,5	9,5–10,5	5,1–6,0	2,0–2,9	1,2–1,4	9,5–11,0	0,8–1,2	<1,0	<0,4	<0,4
ЖС6К-ВИ	0,13–0,2	9,5–12,0	Осн. 5,5	4,0–5,5	5,0–6,0	2,5–3,2	3,5–4,8	4,5–5,5	1,4–1,8	<2,0	<0,4	<0,4

структури нагрітого способом МПН металу ЖС32 порівнювалися з опублікованими даними ФГУП «ВИАМ» ГНЦ рф по нагрітому способом СЛС металу ЖС32 [10, 11]. Для трактування цих результатів з позицій проявів схильності до утворення тріщин для нагрітого металу ЖС32 додатково використовувалися результати досліджень мікроструктури зразків цього матеріалу, одержаних в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України за допомогою електроіскрового процесу.

Дослідження механічних властивостей типових зон зварних з'єднань за наведених вище температур проводилося шляхом їх випробувань на статичний розтяг згідно базових вимог сучасної нормативно-технічної документації та з використанням мініатюрних зразків (рис. 1, а). Обґрунтування застосування і реалізацію даної методики на сервогідролінійній випробувальній машині МТS-810 для нагрітого металу типу ЖС6 висвітлено в раніше опублікованій роботі авторського колективу [9]. Особливості підготовки мініатюрних зразків «50% основного та 50% нагрітого металу» проілюстровано на рис. 1, б, в.

Результати ІЕЗ ім. Є. О. Патона по оцінці механічних властивостей зварного з'єднання «основний–нагрітий метал» стопів ЖС6У та ЖС32, одержаних способом МПН, порівнювалися з опублікованими ФГУП «ВИАМ» ГНЦ рф даними з механічних випробувань нагрітого металу ЖС32 [10], одержаному способом СЛС.

Із використанням описаних вище методик досліджень та аналізу опублікованих даних вивчалися закономірності формування показників міцності і пластичності для зварного з'єднання «основний–нагрітий метал». Експериментальні результати з оцінювання механічних властивостей співвідносилися з відповідними вимогами технічних умов на литий НЖС ЖС6У та ЖС32, що застосову-



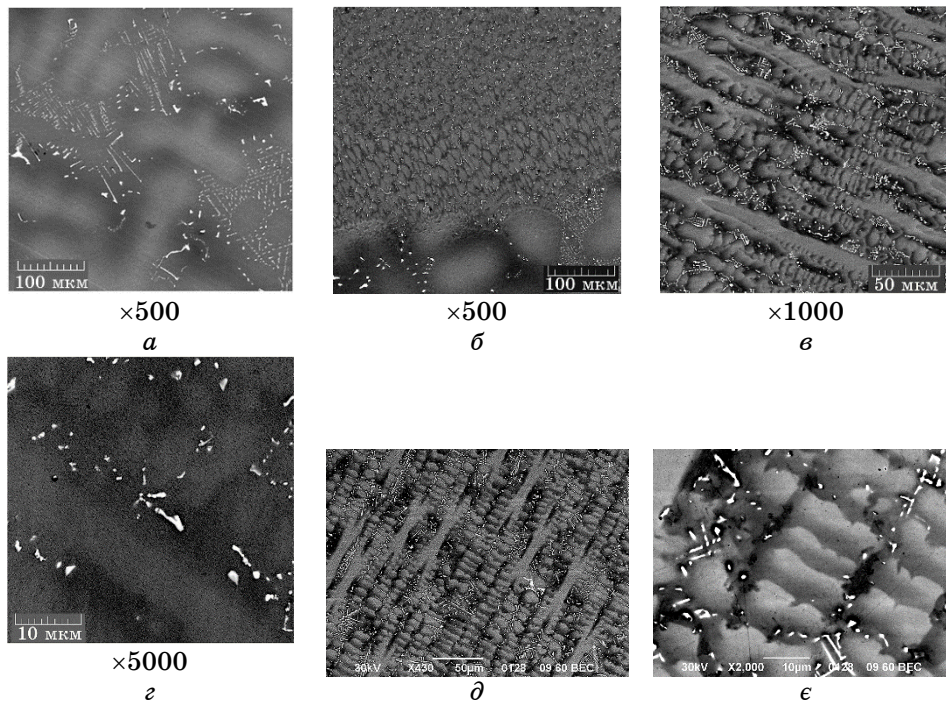
**Рис. 1.** Особливості підготовки мініатюрних зразків «50% основного металу + 50% нагрітого металу» (на прикладі відповідного зварного з'єднання стопу ЖС32).

**Fig. 1.** Features of preparation of miniature specimens '50% of the base metal + 50% of the overlay metal' (on the example of the corresponding alloy ZhS32 welded joint).

ються на українських підприємствах авіадвигунобудування [14].

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Металографічні дослідження зварного з'єднання «основний–натоплений метал» (спосіб МПН) ступу ЖС32, показали, що відповідний натоплений метал характеризується відмінною дендритною структурою, що утворюється при його формуванні і надалі мало змінюється за збільшення до  $\times 1000$  в процесі наступних термічних оброблень (рис. 2, б–г) Основні відмінності натопленого металу порівняно зі структурою серійного литого ступу [3, 14] фіксуються: за відстанню між осями дендритів (10–30 мкм проти 250–350 мкм) та за розподілом карбідної фази. Дендритна структура натопленого металу ЖС6У має подібний характер (рис. 2, д, е), але відрізняється



**Рис. 2.** Особливості мікроструктури основного (а), натопленого металу ступу ЖС32-ВИ (б–г) та натопленого металу ступу ЖС6У (д, е), растрова електронна мікроскопія.

**Fig. 2.** Features of the microstructure of the basic (a), overlay metal alloy ZhS32-VI (б–г) and overlay metal alloy ZhS6U-VI (д, е), scanning electron microscopy.

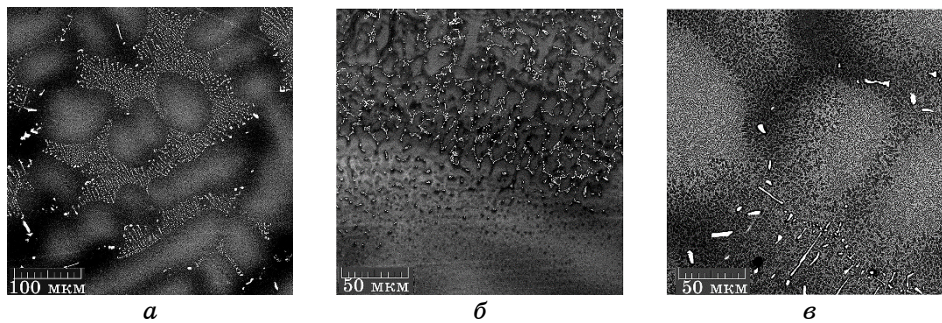
меншою питомою площею міждендритних проміжків.

Структура ЗТВ в основному металі нікелевого жароміцного стопу ЖС32-ВИ в районі лінії стоплення характеризується (рис. 3) утворенням в міждендритних проміжках багаточисельних виділень високодисперсної карбідної евтектики типу  $Me_{23}C_6$  рядкової морфології; розширенням вглиб тіла дендриту на ділянках основного металу, суміжних з лінією стоплення, зон з крупним розміром  $\gamma'$ -фази; виділенням в тілі дендритів в безпосередній близькості від лінії стоплення дрібних поліедричних карбідів розміром до 1,5–2,0 мкм.

Багаточисельні дослідження мікроструктур зварних з'єднань «основний–натоплений метал» за участю стопу ЖС32 з об'ємом його натоплення до 2 см<sup>3</sup>, які виконувалися в ІЕЗ ім. Є. О. Патона та на підприємствах ДП «Івченко-Прогрес» та АТ «Мотор Січ», а також контроль відновлених робочих лопаток капілярною методою показали відсутність систематичних проявів схильності до утворення тріщин. Практика тривалої експлуатації відновлених способом МПН робочих лопаток ТВТ на двигуні Д-18Т підтвердила, що досягнений рівень механічних властивостей як натопленого металу ЖС32, так і зварного з'єднання за його участю є цілком достатнім для відпрацювання міжремонтного ресурсу льотної експлуатації [4, 5].

У натопленому металі стопу ЖС32-ВИ, одержаному методом СЛС (рис. 4), спостерігається близька за будовою та розподілом карбідних фаз високодисперсна дендритна структура з відстанню між осями дендритів до 1 мкм. Проте в такому натопленому металі спостерігається регулярна поява мікротріщин. Слід зазначити, що за даними роботи [11] збереження кристалографічної орієнтації  $\langle 001 \rangle$  у такому натопленому металі ЖС32 не забезпечує його від проявів схильності до утворення тріщин.

Одним із авторів даної роботи попередньо виявлені систематичні

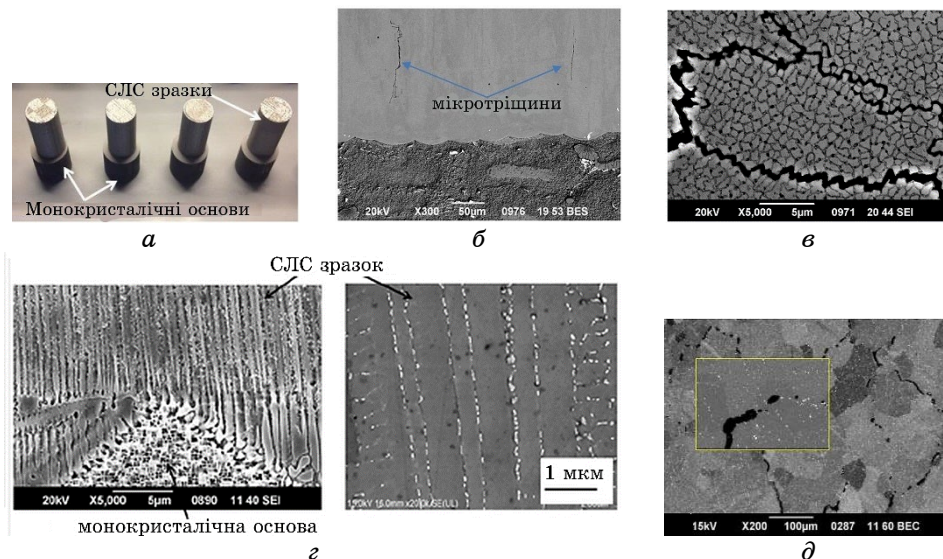


**Рис. 3.** Особливості мікроструктури ЗТВ основного металу стопу ЖС32-ВИ, растрова електронна мікроскопія.

**Fig. 3.** Features of the microstructure of HAZ of the base metal of the alloy ZhS32-VI; scanning electron microscopy.

прояви до утворення мікротріщин під час електроіскрового нагрівання стопу ЖС32 на аналогічний основний метал (рис. 5). Процес електроіскрового нагрівання характеризується щільністю енергії  $W = 10^6 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> та швидкістю охолодження металу  $10^5 - 10^6$ °C/с в діапазоні температур  $T_L - 1200$ °C [15], що близькі до відповідних характеристик сучасного процесу СЛС [12]. Таким чином, для випадку МПН з об'ємом нагрівання менше 2–5 см<sup>3</sup> відсутність проявів схильності до утворення тріщин в процесі формування нагрітого металу можна пов'язати зі швидкостями охолодження 15–55°С/с за температур вище 1200°С [16] і, навпаки, підвищену схильність до утворення тріщин зі швидкостями охолодження матеріалу більше 10<sup>5</sup>°С/с в області високих температур.

Попередні дослідження ІЕЗ ім. Є. О. Патона з оцінювання міцнісних властивостей зварних з'єднань «основний–нагрітий метал» за участю ніклевих жароміцних стопів типу ЖС6 та ЖС32, держаних способом МПН, показують, що при розробці відповідних мето-



**Рис. 4.** Особливості зовнішнього вигляду зразків (а) та мікроструктури при растровій електронній мікроскопії нагрітого металу стопу ЖС32-ВІ (б–г), одержаного способом СЛС (за матеріалами [11]); д — збереження присутності мікротріщин після термобарометричного оброблення (за матеріалами [10]).

**Fig. 4.** Features of the appearance of samples (a) and microstructures obtained on scanning electron microscopy of the deposited metal of the alloy ZhS32-VI (b–g), obtained by the method of selective laser sintering (according to the materials [11]); d—preservation of the presence of microcracks after thermobarometric treatment (according to the materials [10]).

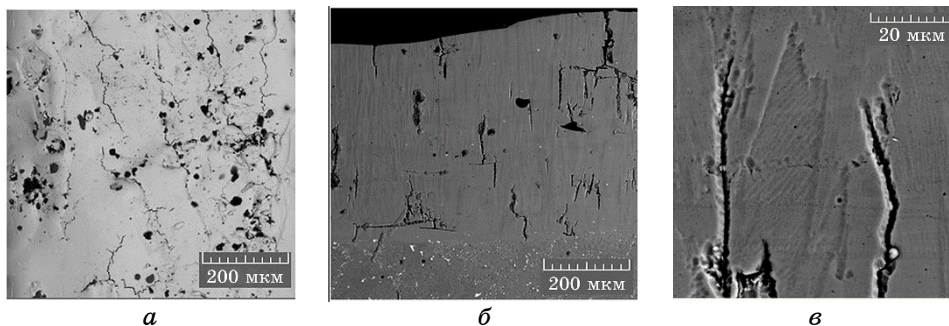


дик оцінювання механічних властивостей слід адекватно враховувати вплив ряду несприятливих чинників:

- підвищення чутливості до утворення тріщин в умовах збільшення об'ємів натоплення більше  $2\text{--}5\text{ см}^3$  [6, 7];
- наявність у складі зварного з'єднання менш міцних і низькопластичних макрозон, в першу чергу, ЗТВ в основному металі та натопленого металу.

Підвищення чутливості до утворення тріщин в умовах збільшення об'ємів багат шарового МПН [6, 7] перш за все можна пов'язати зі зростанням загальних тепловкладень у виріб, переважно пов'язаних зі значним збільшенням тривалості натоплення [8, 17]. Вона в типових умовах відновлення крайки лопатки залежить як від суто розмірів натопленого валика (висота, довжина) [6, 8, 17], так і від безпосереднього впливу на процес МПН ряду технологічних чинників і параметрів, що за натоплення шару збільшують тепловкладення на стадії існування «окремої» зварювальної ванни [16]. До них належать збільшення поперечного перерізу натопленого валика при сталій ширині вузької основи (крайки лопатки); якість та вид технологічних газів; якість присадного порошку, що переважно визначається його відповідністю до вимог обмеження середньовагового вмісту Оксигену та Нітрогену ( $[O] \leq 0,025$  ваг.%;  $[N] \leq 0,005$  ваг.%).

Зазначені вище складові формування загальних тепловкладень у виріб та забезпечення технологічної міцності зварних з'єднань при оцінюванні короткочасних механічних властивостей викликають необхідність обмеження розмірів вихідних заготовок натопленого металу ( $H \leq 30$  мм,  $L \leq 60$  мм) та переходу до плоских мініатюрних з



**Рис. 5.** Утворення тріщин в натопленому металі стопу ЖС32-ВИ (електроіскровий процес, установка Елітрон 22А) за даними растрової електронної мікроскопії: *a* — вигляд поверхні; *б, в* — поперечний переріз.

**Fig. 5.** Cracks formation in the overlay metal of alloy ZhS32 (electrospark process on the installation Elitron 22A): *a*—top surface; *б, в*—cross-section (based on data of scanning electron microscopy).

шириною робочої частини 2,5 мм та її перерізом 6–10 мм<sup>2</sup> [9]. Ефективним прийомом зменшення товщини необхідної зварної заготовки виявилось застосування проміжних захватів-перехідників [9].

Описана вище специфіка утворення зварних з'єднань «основний-натоплений метал» при МПН зумовлює появу у їх складі макрозон з неоднорідними механічними властивостями порівняно з литим основним металом, що залишаються і після проведення штатного термічного оброблення (табл. 2, 3). Експериментальні дані показують, що особливістю структури натопленого металу типу ЖС6 та ЖС32 (рис. 3) є перехід від підвищених показників міцності  $\sigma_B \approx 1200$  МПа і достатньо високих показників пластичності ( $\varepsilon \approx 13-15\%$ ) за кімнатної температури до низькопластичного стану з  $\varepsilon \approx 1,1-2,2\%$  на рівні 0,90–0,95 показників  $\sigma_{0,2}$  або  $\sigma_B$  за температури 1000°C. Однозначно визначитися з характером впливу ЗТВ основного металу (рис. 4) на короточасні механічні властивості за температури 1000°C зварного з'єднання «основний-натоплений метал» стопів ЖС6У-ВИ та ЖС32-ВИ з представлених у табл. 5–6 експериментальних даних складно, проте наведені результати дають підставу зробити висновок щодо пониження на 30–50% показників загальної пластичності зразка за кімнатної температури саме

**ТАБЛИЦЯ 2.** Порівняння результатів випробувань на статичний розтяг мініатюрних зразків на рис. 1, а за кімнатної та підвищеної температури для різних зон зварного з'єднання «основний-натоплений метал» нікелевого жароміцного стопу ЖС6У-ВИ, одержаного способом МПН після штатного термічного оброблення (гомогенізація за температури 1220°C).

**TABLE 2.** Comparison of the results of tensile tests of miniature specimens in Fig. 1, a at room and elevated temperature for different zones of the welded joint 'base-overlay metal' of the nickel-based superalloy ZhS6U-VI, obtained by the microplasma powder overlay welding process (MPOW-process) after regular heat treatment (homogenization at 1220°C).

№	Стоп, тип зразка	$T_{\text{випр}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\varepsilon, \%$
1	Основний метал ЖС6У (4 год)	20	721,7	824,7	3,1
2	ЖС6У–ЖС6У, 50% основного + 50% натопленого металу (2 год)	20	811,8	881,0	2,14
3	Натоплений метал ЖС6У (4 год)	20	897,2	1204,6	12,90
1	Основний метал ЖС6У (4 год)	1000	428,4	504,8	5,50
2	ЖС6У–ЖС6У, 50% основного + 50% натопленого металу (2 год)	1000	375,2	477,1	2,04
3	ЖС6У НМ (2 год)	1000	366,2	476,7	2,15
4	ЖС6У НМ (4 год)	1000	399,2	504,3	2,10

*Примітка:* (2 або 4 год) — тривалість термічного оброблення.

**ТАБЛИЦЯ 3.** Порівняння результатів випробувань на статичний розтяг мініатюрних зразків на рис. 1, а за кімнатної та підвищеної температур для різних зон нікелевого жароміцного стопу ЖС32-ВИ після штатного термічного оброблення (після МПН: 1280°C — 1,5 год; 1050°C — 4–5 год; 900°C — 16 год).

**TABLE 3.** Comparison of the results of tensile tests of miniature specimens in Fig. 1, a at room and elevated temperatures for different zones of nickel-based superalloy ZhS32-VI after heat treatment (after MPOW-process: 1280°C—1.5 hours; 1050°C—4–5 hours; 900°C—16 hours).

№	Стоп, тип зразка	$T_{\text{випр}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\varepsilon, \%$	Джерело даних
1	Основний метал ЖС32	20	843,0	1050,8	18,50	ІЕЗ
2	ЖС32–ЖС32, 50% основного + 50% нато-пленого металу	20	799,5	947,0	7,85	ІЕЗ, МПН
3	Натоплений метал ЖС32	20	845,5	1195,8	14,70	ІЕЗ, МПН
4	Натоплений метал ЖС32 СЛС + ГПІ + ТО	20	824,0	1165,0	6,80	«ВІАМ», [10]
1	Основний метал ЖС32	1000	571,5	624,6	17,06	ІЕЗ, МПН
2	ЖС32–ЖС32, 50% основного + 50% нато-пленого металу	1000	557,0	575,5	1,0	ІЕЗ, МПН
3	Натоплений метал ЖС32	1000	567,0	601,9	1,07	ІЕЗ, МПН
4	Натоплений метал ЖС32 СЛС + ГПІ + ТО	1000	487,0	497,0	0,6	«ВІАМ», [10]

*Примітка:* режим термічного оброблення після СЛС та ГПІ — гомогенізація (1280°C [10] — ймовірно 1,5 год).

через структурні зміни металу в ЗТВ.

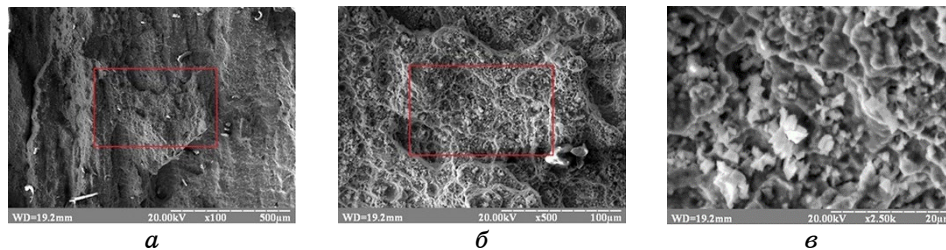
Крихкий характер руйнування натопленого металу НЖС ЖС32, отриманого способом МПН, підтверджується результатами дослідження морфології зламів зразків після випробувань на статичний розтяг за температури 1000°C (рис. 6). Згідно з фрактографічними дослідженнями натоплений метал руйнується частково по межах зерен, частково по межах карбід/матриця, має грубе розшарування та багато осередків руйнування.

Під час розробки відповідних технологій ремонту з використанням процесу МПН достатньо часто зустрічаються технологічні обмеження температури і тривалості термічного оброблення виробу, в першу чергу, через небезпеку пошкодження присутніх на газоохо-

лоджуваних лопатках сучасних авіаційних ГТД внутрішніх і зовнішніх захисних покриттів або паяних з'єднань. Для нагрітого металу ЖС32 серійно застосовувалися такі режими термічного оброблення: 1050°C — 2,5 год [4]; 950°C — 4 год [5]. Але експериментальні дані (табл. 4) свідчать, що режим 1050°C — 2,5 год для термічного оброблення зварного з'єднання «основний–нагрітий метал» стопу ЖС32-ВИ через формування низькопластичного стану в нагрітому металі не дає оптимального рівня властивостей за температури 1000°C за показниками короткочасної і тривалої міцності.

З огляду на те, що за усталеними поглядами штатне термічне оброблення литого металу типу ЖС6 та ЖС32 оптимізує структуру та покращує механічні властивості таких матеріалів [3], то за логікою індукції у зворотньому напрямку при обмеженні температури та/або тривалості термічного оброблення нагрітого металу повинно спостерігатися поступове погіршення показників пластичності, що підтверджується наведеними у табл. 4 відповідними даними для термічного оброблення за режимом 1050°C — 2,5 год. Очікувана межа такого погіршення для нагрітого металу типу ЖС6 та ЖС32 у стані без термічного оброблення —  $\varepsilon_{кр} = 0,1-0,2\%$  в температурному інтервалі 800–1100°C за результатами попередніх досліджень ІЕЗ ім. Є. О. Патона [1, 2] з використанням стандартизованої методики Varestraint test.

Розглянуті у табл. 4 експериментальні дані показують, що низькопластичний структурний стан за температури 1000°C для нагрітого металу ЖС32, одержаного способом МПН, співвідноситься із пониженим рівнем показника тривалої міцності. Оpubліковані дані по тривалій міцності нагрітого металу ЖС32 ( $T = 1050^\circ\text{C}$ ,  $\sigma =$



**Рис. 6.** Поверхня зламу зразка нагрітого металу стопу ЖС32-ВИ (МПН, після штатного термічного оброблення, див. табл. 3) після випробувань на статичний розтяг за температури 1000°C (за даними растрової електронної мікроскопії): *a* —  $\times 100$ ; *б* —  $\times 500$ ; *в* —  $\times 2500$ .

**Fig. 6.** The fracture surface of the sample of the alloy ZhS32-VI overlay metal (MPOW-process, after regular heat treatment, see Table 3) after tests for static tension at a temperature of 1000°C: *a*— $\times 100$ ; *б*— $\times 500$ ; *в*— $\times 2500$  (based on the data of scanning electron microscopy).

**ТАБЛИЦЯ 4.** Порівняння результатів випробувань на статичний розтяг та тривалу міцність зварних з'єднань стопу ЖСЗ2-ВИ за температури 1000°C, одержаних способом МПН.

**TABLE 4.** Comparison of the results of tensile tests and long-term strength of welded joints of alloy ZhS32-VI at 1000°C, obtained by MPOW-process.

№	Стоп, тип зразку	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\varepsilon$ , %	$\sigma_{40}$ , МПа	Джерело даних
1	50% основного + 50% на-топленого металу ЖСЗ2 (МПН + ТО: 1050°C — 2,5 год)	–	–	–	135	ІЕЗ ([4])
2	Натоплений метал ЖСЗ2 (МПН + ТО: 1050°C — 2,5 год)	429,0	429,0	~0,1	–	ІЕЗ, дана робота
3	Натоплений метал ЖСЗ2 (МПН + ТО: 1280°C — 1,5 год; 1050°C — 4...5 год; 900°C — 16 год)	567,0	601,9	1,07	–	ІЕЗ, дана робота
5	Натоплений метал ЖС6У (МПН + ТО: 1050°C — 2,5 год)	385,5	389,0	0,45	–	ІЕЗ, дана робота

= 49 МПа,  $\tau = 11$  год [10]), одержаного СЛС із наступним застосуванням гарячого ізостатичного пресування, за допомогою [18] можна орієнтовно оцінити на рівні 20–30% від нормованої довговічності аналогічного литого серійного стопу.

Таким чином, одержані в ІЕЗ ім. Є. О. Патона та ФГУП «ВИАМ» ГНЦ рф дані свідчать про прямий вплив низькопластичного стану натопленого металу на пониження показників його високотемпературної довговічності. Відомо [19], що низькопластичний стан НЖС також може приводити до пониження показників втомної міцності.

Аналіза ОСТ 1 90126-85 для литих полікристалічних стопів типу ЖС6 та авторитетних посилань на відповідні технічні умови (ТУ) для стопу з направленою структурою ЖСЗ2 [14] показує, що контрольованими параметрами у виробничих умовах є:

- хемічний склад матеріалу;
- показники короточасної міцності за кімнатної температури (табл. 5, випробування на статичний розтяг згідно ГОСТ 1497-84);
- показник витримки без руйнування при статичному навантаженні за підвищеної температури (табл. 5, випробування на тривалу міцність згідно ГОСТ 10145-81).

Не виникає сумніву, що подібний підхід на основі позиціонування відносно загальноприйнятних контрольованих параметрів, за-

кладених в ТУ на литий НЖС, в перспективі повинен бути реалізований і для зварних з'єднань «основний–натоплений метал», що при серійному ремонті крайок деталей авіаційних ГТД способом МПН компенсують втрати їх матеріалу в локальних зонах.

Викладені вище результати оцінювання високотемпературних властивостей зварних з'єднань «основний–натоплений метал» стопів ЖС6У-ВИ та ЖС32-ВИ свідчать про наявність у них низькопластичного стану за температури 1000°C (та ймовірно у близькому до неї діапазоні), пов'язаного з особливостями формування дендритної структури відповідного натопленого металу.

Послідовність механічних випробувань, регламентованих у ТУ на литий НЖС, не розрахована на своєчасне виявлення такого низькопластичного стану у розглянутих зварних з'єднаннях і відсутність етапу випробувань на статичний розтяг за температури 1000°C перед випробуваннями на тривалу міцність порушує причинно-наслідковий зв'язок при аналізі одержаних результатів. Особливо це стосується випадків, коли оптимальне термічне оброблення натопленого металу не може бути проведено через небезпеку пошкодження присутніх на газоохолоджуваних лопатках сучасних авіаційних ГТД внутрішніх і зовнішніх захисних покриттів або паяних з'єднань та накладаються технологічні обмеження за температурою і тривалістю термічного оброблення виробу [4, 5].

Пропонується до комплексу атестаційних випробувань механічних властивостей зварних з'єднань НЖС з вмістом зміцнювальної  $\gamma'$ -фази більше 50% об., еквівалентних обсягам випробувань для ТУ на литий стоп, включити не передбачені в ТУ високотемпературні випробування на статичний розтяг натопленого металу, що дасть змогу своєчасно виявляти порушення технологічної міцності або низькопластичний стан їхніх локальних зон до проведення більш

**ТАБЛИЦЯ 5.** Контрольовані параметри міцності для литих ніклевих жароміцних стопів у нормативно-технічній документації країн пострадянського простору.

**TABLE 5.** Controlled strength parameters for cast nickel-based superalloy in the regulatory and technical documentation of the post-Soviet space.

Стоп	Механічні властивості за температури 20°C		Тривала міцність			Джерело посилання
	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$T_{\text{випр}}$ , °C	$\sigma$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\tau_p$ , ГОД	
ЖС6У-ВИ	≥85,0	≥3,0	975	23	≥40	ОСТ 1 90126-85
ЖС32-ВИ	≥90,0	≥6,0	975	25	≥40	ТУ [14]
ЖС32-ВИ	≥90,0	≥6,0	1000	28	≥40	ТУ [14]

затратних або складних випробувань (тривала міцність, мало- та багато циклова втома, швидкість росту втомною тріщини) та більш адекватно інтерпретувати їх результати.

#### 4. ВИСНОВКИ

Встановлено, що закономірності формування дендритної структури і прояви схильності до утворення тріщин при формуванні натопленого металу важкозварюваного НЖС типу ЖС6 та ЖС32 можна пов'язати зі швидкістю його охолодження в діапазоні температур ліквідус–1200°C. Показано, що поява регулярних мікротріщин при застосуванні процесу СЛС та електроіскрового натоплення на таких матеріалах співвідноситься з реалізацією швидкості охолодження шарів натопленого металу в зазначеному діапазоні більше 10<sup>5</sup>°C/с. Слід відзначити, що наявність збереження кристалографічної орієнтації <001> у натопленому металі ЖС32, одержаному способом СЛС, при зазначених вище умовах формування не забезпечує його від проявів схильності до утворення тріщин.

Встановлено, що механічні властивості натопленого способом МПН металу ЖС6У та ЖС32, що характеризується швидкістю охолодження 15–55°C/с в діапазоні температур ліквідус–1200°C після штатного термічного оброблення стопу, відрізняються переходом від підвищених показників границі міцності ( $\sigma_B \approx 1200$  МПа) і достатньо високих показників пластичності ( $\varepsilon \approx 13$ –15%) за кімнатної температури до низькопластичного стану за температури 1000°C ( $\varepsilon \approx 1,1$ –2,1%) та показниками  $\sigma_{0,2}$  або  $\sigma_B$  на рівні 0,90–0,95 від відповідних показників литого металу. При обмеженні температури термічного оброблення (1050°C — 2,5 год) пластичність натопленого металу за температури 1000°C зменшується: для ЖС32 — до  $\varepsilon \approx 0,1\%$ , рівень  $\sigma_B$  відносно литого стопу — 0,65; для ЖС6У —  $\varepsilon \approx 0,45\%$ ; рівень  $\sigma_B$  відносно литого стопу — 0,77.

Низькопластичний стан натопленого металу типу ЖС6У та ЖС32 через значно менший рівень критичної деформації може бути однією з найбільш ймовірних причин утворення одиничних тріщин повторного нагріву за багат шарового натоплення та наступного термічного оброблення. Сприятливі умови для утворення таких тріщин виникають при перевищенні об'єму натоплення понад 2–5 см<sup>3</sup> за висотою та довжиною натопленого валика.

Показано, що низькопластичний стан натопленого металу ЖС32 за температури 1000°C визначає рівень короткочасних механічних характеристик зварного з'єднання «основний–натоплений метал» в цілому, а також його тривалої міцності.

З огляду на одержані і систематизовані в ІЕЗ ім. Є. О. Патона результати пропонується до комплексу атестаційних випробувань механічних властивостей зварних з'єднань НЖС з вмістом зміцнюва-

льної  $\gamma'$ -фази більше 50 об. % включити високотемпературні випробування на статичний розтяг нагрітого металу, не передбачені у необхідному комплексі механічних випробувань ТУ на литий стоп.

Необхідне проведення додаткових досліджень з метою вивчення технологічних та мікроструктурних аспектів формування низькопластичного стану у зварних з'єднаннях НЖС типу ЖС6 та ЖС32, одержаних способом МПН, і наступної його зміни в процесі термічних оброблень. Найбільш раціональною методикою даних досліджень представляється прецизійна вирізка мініатюрних зразків з типових зон нагрітого металу та району лінії стоплення і проведення випробувань на статичний розтяг за підвищених температур паралельно з аналізом їхньої мікроструктури.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. К. А. Yushchenko, V. S. Savchenko, L. V. Chervyakova, S. Devyd, and Dzh. Vytek, *The Paton Welding J.*, **6**: 2 (2005).
2. І. А. Петрик, *Процеси відновлення зварюванням та паянням лопаток газотурбінних двигунів з важкозварюваних сплавів на нікелевій та титановій основі* (Автореферат дис. канд. техн. наук) (Київ: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ: 2007).
3. В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк, В. К. Яценко, А. Я. Качан, Э. И. Цивирко, С. Б. Беликов, М. Р. Орлов, В. Е. Замковой, В. Ф. Мозговой, О. В. Врубель, *Технологическое обеспечение эксплуатации характеристик деталей ГТД, Лопатки турбины, Часть II, Монография* (Запорожье: ОАО «Мотор Сич: 2003).
4. К. А. Yushchenko, V. S. Savchenko, A. V. Yarovytsyn, A. A. Nakonechny, G. F. Nastenko, V. E. Zamkovej, O. S. Belozertsev, and N. V. Andrejchenko, *The Paton Welding J.*, **8**: 21 (2010).
5. P. D. Zhemanyuk, I. A. Petrik, and S. L. Chigilejchik, *The Paton Welding J.*, **8**: 39 (2015).
6. К. А. Ющенко, А. В. Яровицын, А. А. Фомакин, Ю. В. Олейник, Ю. В. Гусев, *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин: Збірник наукових статей* (Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ: 2016), с. 696.
7. К. А. Yushchenko, A. V. Yarovytsyn, and N. O. Chervyakov, *The Paton Welding J.*, **2**: 2 (2017).
8. К. А. Ющенко, Г. В. Звягінцева, О. В. Яровицын М. О. Черв'яков, Г. Д. Хрущов, І. Р. Волосатов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 10: 1345 (2019).
9. К. А. Yushchenko, A. V. Yarovytsyn, N. O. Chervyakov, H. V. Zvyahintseva, I. R. Volosatov, and H. D. Khrushchov, *The Paton Welding J.*, **7**: 29 (2019).
10. А. Н. Раевских, Н. В. Петрушин, Е. Б. Чабина, *Конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (30 Марта, 2018)* (Москва: ВИАМ: 2018), с. 354.
11. Н. В. Петрушин, А. Г. Евгенов, А. Г. Тренников, *Конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (23 Марта, 2017)* (Москва: ВИАМ: 2017),



- с. 271.
12. Е. А. Лукина, К. О. Базалеева, Н. В. Петрушин, Е. В. Цветкова, *Цветные металлы*, **3**: 55 (2016).
  13. Y.-C. Hagedon, T. Risse, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach, and R. Poprawe, *International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (Oct. 1–5, 2013)* (London: Taylor & Francis: 2014), p. 291.
  14. Е. В. Милонин, Н. А. Лысенко, В. В. Наумик, *Авиационно-космическая техника и технология*, **8**: 83 (2016).
  15. J. Liu, R. Wang, and Y. Qian, *Surf. Coat. Technol.*, **200**: 2433 (2005).
  16. O. V. Yarovytsyn, H. D. Khuschchov, and S. L. Chyhileychik, *Int. J. Mech. Production Eng.*, **7**: 5 (2019).
  17. К. А. Yushhenko, A. V. Yarovitsyn, and N. O. Chervjakov, *The Paton Welding J.*, Nos. 5–6: 143 (2016).
  18. В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, И. П. Конакова, *Структура и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗ2-ВИ: Справочник* (Екатеринбург: «Квист»: 2010).
  19. А. Н. Петухов, *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, **3**, № 34: 17 (2012).

## REFERENCES

1. К. А. Yushchenko, V. S. Savchenko, L. V. Chervyakova, S. Devyd, and Dzh. Vytek, *The Paton Welding J.*, **6**: 2 (2005).
2. I. A. Petrik, *Protsesy Vidnovlennya Zvaryvannyam ta Payannyam Lopatok Gazoturbinykh Dvyguniv z Vazhkozvaryvanykh 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).
3. V. A. Bohuslaev, F. M. Muravchenko, P. D. Zhemanyuk, V. K. Yacenko, A. Ya. Kachan, Ye. I. Civirko, S. B. Belikov, M. R. Orlov, V. E. Zamkovej, V. F. Mozgovej, and O. V. Vrubel', *Tekhnologicheskoe Obespechenie Ekspluatatsionnykh Charakteristik Detaley GTD, Lopatki Turbiny, Chast' II* [Technological Support for Operational Characteristics of Gas Turbine Engine Parts, Turbine Blades, Part II, Monograph], (Zaporozhye: OAO 'Motor Sich': 2003) (in Russian).
4. К. А. Yushchenko, V. S. Savchenko, A. V. Yarovitsyn, A. A. Nakonechny, G. F. Nastenko, V. E. Zamkovej, O. S. Belozertsev, and N. V. Andrejchenko, *The Paton Welding J.*, **8**: 21 (2010).
5. P. D. Zhemanyuk, I. A. Petrik, and S. L. Chigilejchik, *The Paton Welding J.*, **8**: 39 (2015).
6. К. А. Yushchenko, A. V. Yarovytsyn, A. A. Fomakyn, Yu. V. Oleynyk, and Yu. V. Husev, *Problemy Resursu i Bezpeky Ekspluatatsiyi Konstruktsiy Sporud ta Mashyn: Zbirnyk Naukovykh Statey* [Problems of Resource and Safety of Operation of Structures of Buildings and Machines: Compilation of Scientific Articles] (Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S.U.: 2016), p. 696 (in Ukrainian).
7. К. А. Yushchenko, A. V. Yarovytsyn, and N. O. Chervyakov, *The Paton*

- Welding J.*, **2**: 2 (2017).
8. K. A. Yushchenko, H. V. Zvyahintseva, O. V. Yarovytsyn, M. O. Cherv'yakov, H. D. Khrushchov, and I. R. Volosatov, *Metalofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 10: 1345 (2019) (in Ukrainian).
  9. K. A. Yushchenko, A. V. Yarovytsyn, N. O. Chervyakov, H. V. Zvyahintseva, I. R. Volosatov, and H. D. Khrushchov, *The Paton Welding J.*, **7**: 29 (2019).
  10. A. N. Raevskih, N. V. Petrushin, and E. B. Chabina, *Proc. of Symp. Additive Technologies: Present and Future (30 March 2018)* (Moscow: VIAM: 2018), p. 354 (in Russian).
  11. N. V. Petrushin, A. G. Evgenov, and A. G. Trennikov, *Proc. of Symp. Additive Technologies: Present and Future (23 March, 2017)* (Moscow: VIAM: 2017), p. 271 (in Russian).
  12. E. A. Lukina, K. O. Bazaleeva, N. V. Petrushin, and E. V. Cvetkova, *Tsvetnye Metally*, **3**: 55, (2016) (in Russian).
  13. Y.-C. Hagedon, T. Risse, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach, and R. Poprawe, *International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (Oct. 1–5, 2013)* (London: Taylor & Francis: 2014), p. 291.
  14. E. V. Milonin, N. A. Lysenko, and V. V. Naumik, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, **8**: 83 (2016) (in Russian).
  15. J. Liu, R. Wang, and Y. Qian, *Surf. Coat. Technol.*, **200**: 2433 (2005).
  16. O. V. Yarovytsyn, H. D. Khuschchov, and S. L. Chyhileychik, *Int. J. Mech. Production Eng.*, **7**: 5 (2019).
  17. K. A. Yushhenko, A. V. Yarovitsyn, and N. O. Chervjakov, *The Paton Welding J.*, Nos. 5–6: 143 (2016).
  18. V. P. Kuznecov, V. P. Lesnikov, and I. P. Konakova, *Struktura i Svoystva Zharoprochnogo Nikelevogo Splava ZhS32-VI: Spravochnik* [Structure and Properties of Heat-Resistant Nickel Alloy ZhS32-VI: Reference Book] (Ekaterinburg: 'Kvist': 2010) (in Russian).
  19. A. N. Petuhov, *Vestnik Samarского Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta*, **3**, No. 34: 17 (2012) (in Russian).