

# РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ СЕКТОРУ СОПЛОВИХ ЛОПАТОК З ВАЖКОЗВАРЮВАНОГО НІКЕЛЕВОГО ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ ТИПУ ЖС6 МІКРОПЛАЗМОВИМ ПОРОШКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

К.А. Ющенко, О.В. Яровицин, О.О. Наконечний, І.Р. Волосатов, О.О. Фомакін, Г.Д. Хрущов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Для забезпечення технологічної міцності при відновленні бокового ущільнюючого елемента сектору соплових лопаток зі сплаву ЖС6К з необхідним об'ємом наплавлення  $7...13 \text{ см}^3$  обрано менш жароміцний матеріал з достатньою деформаційною здатністю. При мікроплазмовому порошковому наплавленні він характеризується наступним рівнем показників короткочасної міцності відносно наплавленого металу ЖС6К: при  $20 \text{ }^\circ\text{C} - 0,7...0,8$ ; при  $1000 \text{ }^\circ\text{C} - 0,5...0,55$ . Порівняно з відомими технологічними рішеннями на основі присадних матеріалів типу IN625 це дозволило підвищити рівень жароміцності наплавленого металу при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  практично у 2 рази при ефективному обмеженні високотемпературної пластичності  $\epsilon_{1000 \text{ }^\circ\text{C}} \leq 1,0...1,5 \%$ . На основі наведених матеріалознавчих досліджень в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена нова ремонтна технологія мікроплазмового порошкового наплавлення, що успішно пройшла дослідно-практичну перевірку на ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор». Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

*Ключові слова:* нікелевий жароміцний сплав ЖС6К, мікроплазмове порошкове наплавлення об'ємом  $7...13 \text{ см}^3$ , деформаційна здатність, технологічна міцність, показники короткочасної міцності, ремонтна технологія

Відомо [1], що при напрацюванні більше 700 год. на одному з сучасних газотурбінних двохконтурних авіаційних двигунів з форсажною камерою згоряння значно зростає відносна кількість пошкоджених деталей. Типовим представником таких деталей є сектор соплових лопаток (ССЛ) турбіни високого тиску (ТВТ) з нікелевого жароміцного сплаву (НЖС) ЖС6К, (рис. 1, а та табл. 1), що належить до групи статорних деталей. Одними з основних видів експлуатаційних пошкоджень даного ССЛ, що роблять неможливим застосування існуючих технологій відновлення з використанням способів на основі зварювання плавленням та паяння, є тріщини термічної втоми (рис. 1, б) та втрата або пошкодження конструктивно заданої форми значної кількості секцій бокового ущільнюючого елемента внаслідок корозійно-ерозійних пошкоджень при високих температурах (рис. 1, в). Розробка таких дефектів вимагає практично повного видалення матеріалу бокового ущільнюючого елемента ССЛ ТВТ (рис. 1, г).

Конструктивно-технологічний аналіз типової ремонтної розробки бокового ущільнюючого елемента ССЛ ТВТ (рис. 2, а, б) показав необхідність на-

плавлення значних об'ємів НЖС  $v_{\text{н}} = 7...13 \text{ см}^3$  в залежності від кількості його пошкоджених секцій. Використання у якості наплавленого металу для бокового ущільнюючого елемента сплавів типу IN625 без дисперсного зміцнення  $\gamma'$ -фазою (див. табл. 1) для даного ССЛ визнано недоцільним через небезпеку втрати просторової стійкості відновленого конструктивного елемента внаслідок низької жароміцності і підвищеної пластичності такого матеріалу при експлуатації за  $T \geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Слід відзначити, що попередніх прикладів застосування ремонтних технологій деталей авіаційних ГТД з подібним збільшеним об'ємом наплавлення ЖНС з високим вмістом зміцнюючої  $\gamma'$ -фази авторам даної роботи невідомо. Аналіз опублікованих робіт на пострадянському просторі показав, що для відновлення експлуатаційних пошкоджень робочих лопаток з ЖНС типу ЖС32 практично використовувались технології мікроплазмового порошкового (МПН) та лазерно-порошкового наплавлення з  $v_{\text{н}}$  до  $2 \text{ см}^3$  (наприклад, [2–5]).

Першочерговою задачею при розробці технології відновлення бокового ущільнюючого елемента

Таблиця 1. Вміст основних легуючих елементів у нікелевих сплавах ЖС6К та IN625, мас. %

Сплав	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Re	Fe	B
ЖС6К	0,13...0,2	9,5...12,0	Основа	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	<0,02
IN625	0,10 max	20,0...23,0	-	1,0 max	0,4 max	0,4 max	8,0...10,0	-	3,15...4,15	-	-	5,0 max	-

Ющенко К.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6276-7843>, Яровицин О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9922-3877>, Наконечний О.О. – <https://orcid.org/0000-0002-6098-0413>, Волосатов І.Р. – <https://orcid.org/0000-0003-2593-9869>, Фомакін О.О. – <https://orcid.org/0000-0001-8903-3340>, Хрущов Г.Д. – <https://orcid.org/0000-0002-4045-3587>  
© К.А. Ющенко, О.В. Яровицин, О.О. Наконечний, І.Р. Волосатов, О.О. Фомакін, Г.Д. Хрущов, 2020

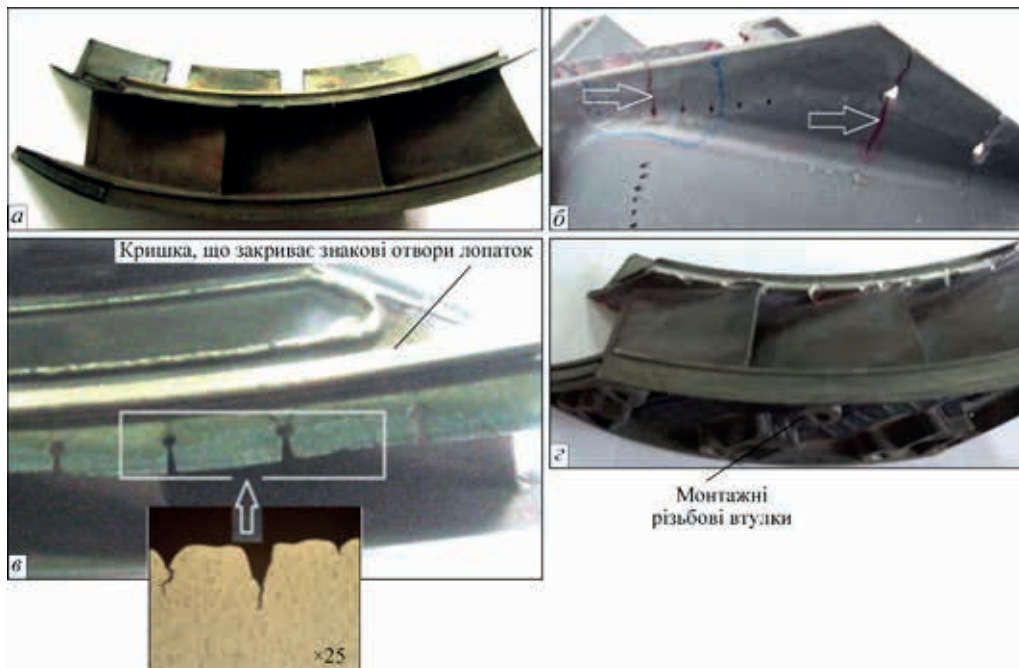


Рис. 1. Зовнішній вигляд ССЛ ТВТ зі сплаву ЖС6К (а), його експлуатаційних пошкоджень (б, в) та розробки дефектів на боковому ущільнюючому елементі (з)

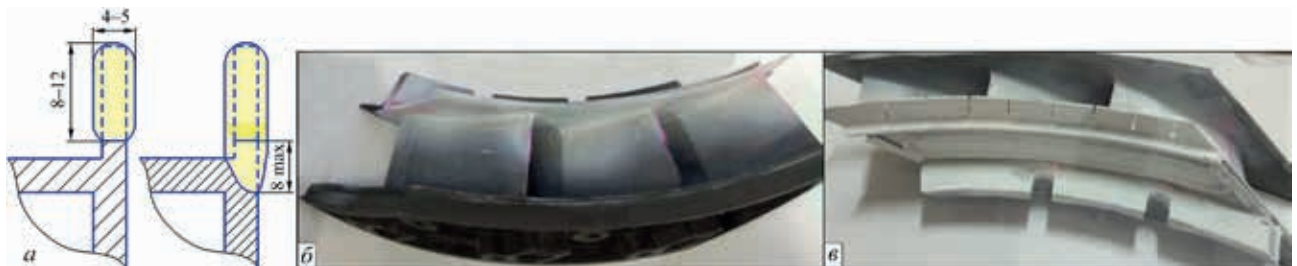


Рис. 2. Характеристики необхідного поперечного перерізу наплавленого валика при відновленні бокового ущільнюючого елемента ССЛ ТВТ зі сплаву ЖС6К (а) та зовнішній вигляд його відновленої поверхні багатошаровим МПН після капілярної дефектоскопії (б, в)

зазначеного ССЛ ТВТ була оцінка схильності до утворення тріщин для типової структури наплавленого способом МПН сплаву ЖС6К (рис. 3) при послідовному збільшенні його об'єму у напрямку відповідного зростання висоти  $H$  та довжини  $L$  наплавленого валика з метою забезпечення технологічної міцності такого зварного з'єднання (див. рис. 2, б) у стані безпосередньо після наплавлення. Аналогічно попередній роботі [6], присвяченій оцінці схильності до утворення тріщин при МПН сплаву ЖС32, відповідні оцінки з позицій визначення основних показників загальних тепловкладень у виріб проведено і для наплавленого металу ЖС6К (рис. 4). Встановлено, що в умовах типових задач МПН з відновлення бандажних полиць робочих лопаток ( $L \approx 35 \dots 40$  мм;  $H \leq 5$  мм;  $v_n \leq 2,0$  см<sup>3</sup>) у зварному з'єднанні «основний-наплавлений метал» сплаву типу ЖС6 тріщини не утворюються. Але вже при збільшенні довжини валика понад  $L = 100$  мм в процесі багатошарового наплавлення висотою більше 5...7 мм ( $v_n > 4 \dots 6$  см<sup>3</sup>) в наплавленому металі ЖС6К у більшості випадків починає проявлятися схильність до утворення тріщин

повторного нагріву. Їх поява обумовлена сукупною дією двох факторів: формуванням значних залишкових поздовжніх напружень [7] та встановленою низькою деформаційною здатністю сформованого наплавленого металу ЖС6К (табл. 2). Таким чином, для умов відновлення бокового ущільнюючого елемента ССЛ ТВТ багатошаровим МПН встановлено неможливість забезпечення технологічної міцності при використанні у якості наплавленого металу сплаву ЖС6К через його низьку деформаційну здатність в процесі наплавлення.

Періодичне підвищення деформаційної здатності наплавленого металу ЖС6К (до рівня  $\epsilon_{1000^\circ\text{C}} = 5,8 \dots 7,2$  % [7]) шляхом проведення вакуумної термічної обробки при температурі го-

Таблиця 2. Результати випробувань наплавленого металу ЖС6К на статичний розтяг у стані безпосередньо після наплавлення (без термічної обробки)

Номер, тип	$T_{\text{вирп}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\epsilon, \%$
1	20	1004	1004	0,5
2	900	639	641	0,8
3	1000	377	386,5	0,65
4	1100	—	256	0,1

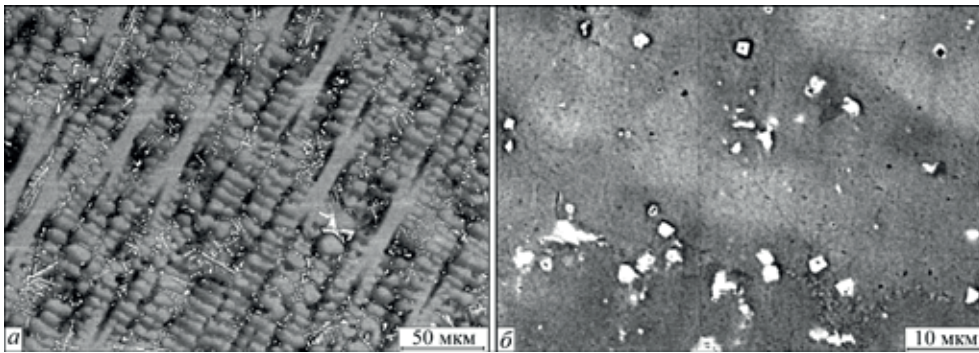


Рис. 3. Особливості мікроструктури наплавленого металу ЖС6К у стані безпосередньо після наплавлення, растрова електронна мікроскопія

могенізації на даному ССЛ ТВТ не могло бути реалізовано через конструктивно-технологічні обмеження за температурою термічної обробки. Вони обумовлені присутністю на ньому паяних з'єднань (кришка знакового отвору, монтажні різьбові втулки) за участю припою Впр11-40Н. Температура формування такого паяного з'єднання значно менше температури гомогенізації сплаву ЖС6К [8].

З огляду на неможливість забезпечення технологічної міцності при відновленні бокового ущільнюючого елементу ССЛ ТВТ при використанні у якості наплавленого металу сплаву ЖС6К прийнято рішення застосувати наплавлений метал меншої жароміцності. Випробування на статичний розтяг зразків-свідків такого наплавленого металу (рис. 5), проведені на сервогідролінійній машині МТS-810 за методикою роботи [9], показали, що досягається наступний рівень показників короточасної міцності відносно наплавленого металу ЖС6К: при 20 °С – 0,7...0,8 при 1000 °С – 0,5...0,55.

Порівняно з існуючими/відомими технологічними рішеннями, що передбачають використання присадних матеріалів типу IN625 з жароміцністю  $\sigma_{в,1000\text{ }^{\circ}\text{C}} \approx 110 \text{ МПа}$ , новий технологічний підхід, крім стабільного забезпечення технологічної міцності багат шарового МПН об'ємом  $v_n = 7...13 \text{ см}^3$ , дозволив підвищити рівень жароміцності наплавленого металу при 1000 °С практично у 2 рази та додатково ефективно обмежив його високотемпературну пластичність  $\epsilon_{1000\text{ }^{\circ}\text{C}} \leq 1,0...1,5 \%$ . З огляду на відомий рівень експлуатаційних навантажень даного ССЛ ТВТ ( $\approx 20 \text{ МПа}$  [1]), оцінені показники жароміцності наплавленого металу дозволяють прогнозувати для його відновленого бокового ущільнюючого елементу наявність необхідного комплексу функціональних властивостей, зокрема, просторової стійкості, необхідний для забезпечення надійної роботи на сучасних авіаційних ГТД типу РД-33.

За матеріалами проведених досліджень для Луцького ремонтного заводу «Мотор» за розро-

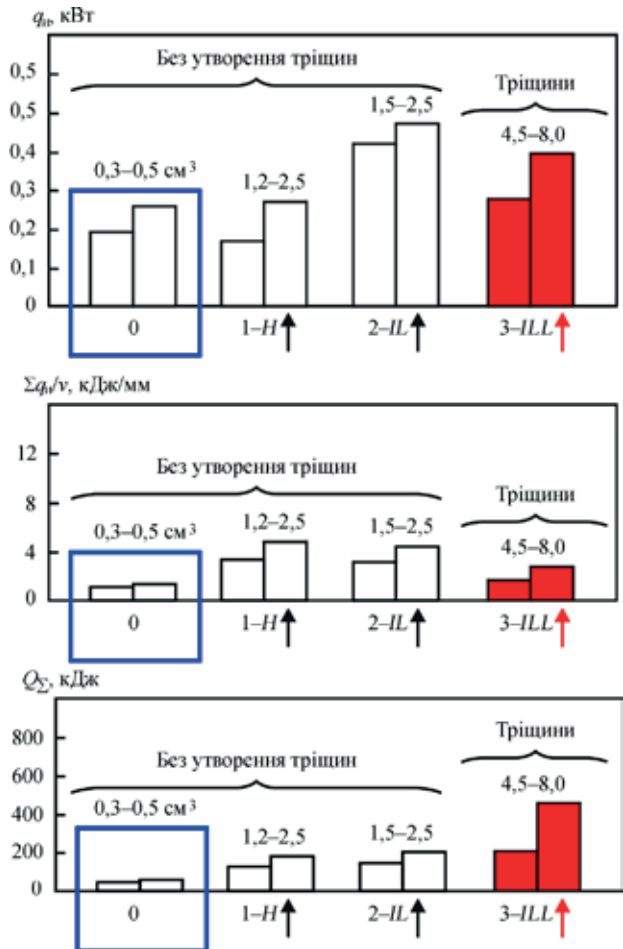


Рис. 4. Аналіз закономірностей забезпечення технологічної міцності в наплавленому металі сплаву ЖС6К в залежності від ряду показників кількості тепловкладень у виріб ( $q_n$  – ефективна потужність мікроплазмової дуги;  $\Sigma q_n/v$  – сума погонних енергій усіх шарів наплавлення;  $Q_\Sigma$  – загальні тепловкладення у виріб) та його об'єму. Технологічний варіант «0» відповідає описанам в тексті умовам МПН бандажних полиць робочих лопаток ТВТ. H – 10...15 мм; I – 15...30 А; L – 50 мм; LL – 100...200 мм

бленою в ІЕЗ ім. Є.О. Патона технологією виконано ремонт дослідної партії зазначених ССЛ ТВТ зі сплаву ЖС6К (див. рис. 2, в) та розроблено відповідну технологічну інструкцію.



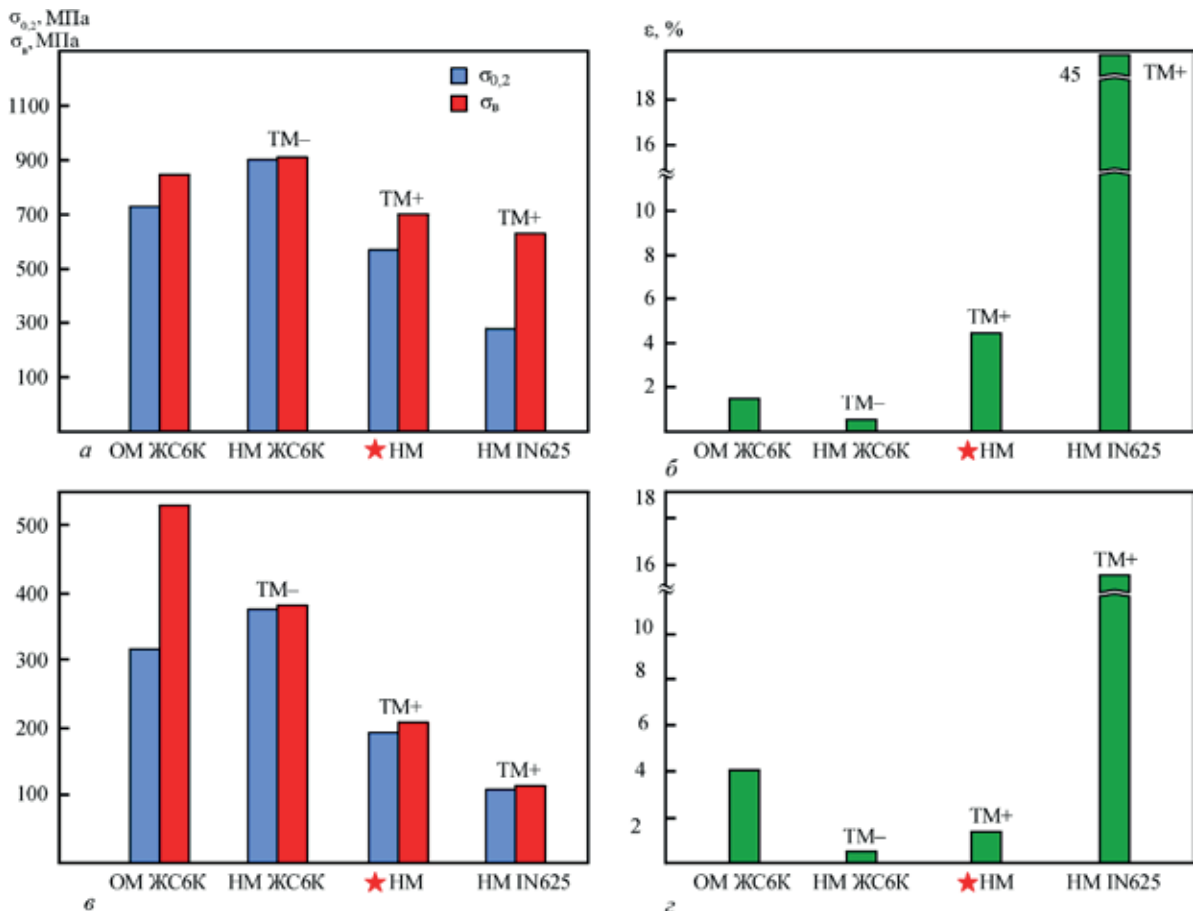


Рис. 5. Аналіз короткочасних механічних властивостей різних варіантів наплавленого металу та закономірностей забезпечення його технологічної міцності при відновленні бокового ущільнюючого елемента ССЛ ТВТ (OM – основний метал; НМ наплавлений метал; ★НМ – обрана система наплавленого металу; TM+ і TM– — технологічна міцність відповідно забезпечується або не забезпечується). Короткочасні механічні властивості основного металу ЖС6К наведено за даними роботи [10]: а, б – 20 °С; в, г – 1000; (ε – ×25)

Робота виконана у рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» у 2016–2020 рр.

**Список літератури**

1. Карпинос Б.С., Коровин А.В., Лобунько А.П., Ведищева М.Ю. (2014) Эксплуатационные повреждения турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажной камерой сгорания. *Вестник двигателестроения*, 1, 18–24.
2. Ющенко К.А., Яровицын А.В. (2012) Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД. *Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»*. Збірник наукових статей. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, сс. 506–509.
3. Жеманюк П.Д., Петрик І.А., Чигилейчик С.Л. (2015) Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. *Автоматическая сварка*, 8, 43–46.
4. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Фомакин А.А. и др. (2016) Разработка технологии микроплазменной порошковой наплавки сплава ЖС32 для восстановления газоохлаждаемых рабочих лопаток авиационной турбины высокого давления. *Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»*. Збірник наукових статей. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, сс. 696–701.
5. Неруш С.В., Ермолаев А.С., Роголев А.М., Василенко С.А. (2016) Исследование технологии восстановления торца пера рабочей лопатки первой ступени турбины высокого давления (ТВД) из сплава ЖС32-ВИ методом лазерно-порошковой наплавки с применением металлического порошка сплава ЖС32-ВИ, изготовленного методом атомиза-

6. 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. *Автоматическая сварка*, 2, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.02.01>
7. Ющенко К. А., Звягинцева Г. В., Яровицын О. В. та ін. (2019) Нові підходи в оцінці механічних характеристик та мікроструктури відновлених деталей ГТД із никелевих жаропрочних сплавів. *Металофізика та новітні технології*, 10, 41, 1345–1364. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345>
8. Ермолаев Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Підручник. Хорунгов В.Ф. і Квасницький В.Ф. (редактори). Миколаїв. НУК.
9. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. и др. (2019) Оценка кратковременных механических свойств соединений трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6. *Автоматическая сварка*, 7, 38–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.07>
10. Кишкин С.Т. (2006) *Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов*. Избранные труды. Москва, Наука.

**References**

1. Karpinos, B.S., Korovin, A.V., Lobunko, A.P., Vedishcheva, M.Yu. (2014) Operational damage of turboreactive bypass engines with afterburner. *Vestnik Dvigatelistroeniya*, 2, 18-24 [in Russian].
2. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V. (2012) Improvement of technology for restoration of upper shroud of blades of aircraft GTE. In: *Problems of residual life and safe operation of structures, constructions and machines, NASU*. Kyiv, PWI, 506-509 [in Russian].
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, 39-42.

4. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V., Fomakin, A.A. et al. (2016) Development of technology of microplasma surfacing of ZhS32 alloy for reconditioning of gas-cooled blades of aircraft high-pressure turbine. In: *Problems of residual life and safe operation of structures, constructions and machines, NASU*. Kyiv, PWI, 696-701 [in Russian].
5. Nerush, S.V., Ermolaev, A.S., Rogalev, A.M., Vasilenko, S.A. (2016) Investigation of the technology of restoration of blade airfoil edge of first stage high-pressure turbine from ZhS32-VI alloy by laser-powder surfacing method using the metal powder of ZhS32-VI alloy manufactured with atomization method. *Electron. J.: Trudy VIAM*, **8**, 44, 24-34. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-8-4-4>
6. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, 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/10.15407/as2017.02.01>
7. Yushchenko, K.A., Zvyagintseva, G.V., Yarovitsyn, A.V. et al. (2019) New approaches in evaluation of mechanical characteristics and microstructure of repaired GTE parts from nickel high-temperature alloys. *Metalo fizyka ta Novitni Tekhnologii*, **10**, 41, 1345-1364 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345>.
8. Ermolaev, G.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F. (2015) *Soldering of materials: Manual*. Ed. by V.F. Khorunov et al. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
9. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, 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/as2019.07.07>.
10. Kishkin, S.T. (2006) *Development, investigation and application of high-temperature alloys*. In: Selected works. Moscow, Nauka [in Russian].

## DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF RECONDITIONING THE SEALING ELEMENT OF NOZZLE BLADES FROM DIFFICULT-TO-WELD HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY OF ZHS6 TYPE BY MICROPLASMA POWDER SURFACING

K.A. Yushchenko, O.V. Yarovitsin, O.O. Nakonechniy, I.R. Volosatov, O.O. Fomakin, G.D. Khrushchov

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

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

In order to ensure the technological strength at reconditioning of the side sealing element of a sector of nozzle blades from ZhS6K alloy with the required deposition volume of 7...13 cm<sup>3</sup>, a less heat-resistant material with sufficient deformability was selected. At microplasma powder surfacing it is characterized by the following level of values of short-time strength relative to the deposited metal ZhS6K: at 20 °C – 0.7...0.8; at 1000 °C – 0.5...0.55. Compared to the known technological solutions based on filler materials of IN625 type, it allowed increasing the level of deposited metal high-temperature strength by practically 2 times at 1000 °C at effective limitation of high-temperature ductility  $\epsilon_{1000\text{ °C}} \leq 1.0...1.5\%$ . Proceeding from the described materials science studies, PWI developed a new repair technology of microplasma powder surfacing that has successfully passed experimental-practical trials at SE «Lutsk Repair Plant «Motor». 10 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

*Keywords: high-temperature nickel alloy ZhS6K, microplasma powder spraying of 7...13 cm<sup>3</sup> volume, deformability, technological strength, short-time strength values, repair technology*

Надійшла до редакції 07.10.2020

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING-ENGINEERING — JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN THE WORLD!

13. – 17. September, 2021

REGISTER NOW!

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN No. 1 IN THE WORLD

MESSE ESSEN

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY