

<https://doi.org/10.15407/knit2022.03.003>
УДК 621.791.(92+046), 669.245, 53.083.92

К. А. ЮЩЕНКО¹, акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
ORCID 0000-0002-6276-7843

О. В. ЯРОВИЦИН¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук
ORCID 0000-0001-9922-3877

E-mail: yarovytsyn@ukr.net

Г. Д. ХРУЩОВ¹, мол. наук. співроб.
ORCID 0000-0002-4045-3587

І. А. ПЕТРИК², голов. зварник, канд. техн. наук
ORCID-0000-0001-6600-1661

С. Л. ЧИГИЛЕЙЧИК², нач. бюро зварювання
ORCID 0000-0002-2372-9078

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України
вул. Казимира Малевича 11, Київ, Україна, 03150

² Акціонерне товариство «МОТОР СІЧ»
пр-т Мотобудівників 15, Запоріжжя, Україна, 69068

ДОСЛІДЖЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СЕРІЙНОГО РЕМОНТУ РОБОЧИХ ЛОПАТОК АВІАЦІЙНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА Д-18Т МІКРОПЛАЗМОВИМ ПОРОШКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

Розглянуто особливості серійного ремонту робочих лопаток турбіни високого тиску авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т з обмежено зварюваного нікелевого жароміцного сплаву ЖС32-ВІ способом мікроплазмового порошкового наплавлення. Показано, що зі збільшенням тривалості експлуатації даних лопаток понад б...8 тис. год у зварному з'єднанні «основний — наплавлений метал» відновлених бандажних полиць збільшується схильність до утворення тріщин при зварюванні плавленням та наступній термічній обробці.

Показано, що забезпечення стабільного формування напавленого валика на поверхню торців бандажних полиць даних робочих лопаток вимагає використання нестационарних імпульсних режимів зварювального струму прямої полярності. З урахуванням значної кількості технологічних параметрів розглянутого процесу суб'єктивний аналіз таких режимів вкрай складний. Викладено методику уточнення вимог до таких режимів одношарового мікроплазмового порошкового наплавлення в діапазоні діючих струмів 7...20 А за критеріями ефективної теплової потужності дуги та погонної енергії, що передбачає використання системи реєстрації і подальшої цифрової обробки залежності зварювального струму від часу наплавлення бандажної полиці. На основі аналізу статистичних даних з кількісної оцінки схильності дослідженого зварного з'єднання до утворення тріщин встановлено оптимальний діапазон середніх значень цих узагальнених параметрів режимів наплавлення для використання в ручному та роботизованому процесі, при якому в кінці технологічного циклу фіксується не більше декількох відсотків відновлених лопаток з виявленими тріщинами.

Показано, що суттєвими технологічними факторами, що впливають на кількість технологічного браку при відновленні розглянутих робочих лопаток, є середня величина діючого зварювального струму та якість присадного порошку ЖС32, яка в першу чергу характеризується середньоваговим вмістом кисню і азоту в його дисперсних частках. Показано, що

Цитування: Ющенко К. А., Яровицин О. В., Хрущов Г. Д., Петрик І. А., Чигилейчик С. Л. Дослідження і оптимізація процесу серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3 (136). С. 3—16. <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.003>

збільшення середньовагового вмісту газових домішок у присадному порошку, передусім кисню, викликає суттєве зростання енерговитрат на формування наплавленого валика у процесі мікроплазмового порошкового наплавлення. Запропоновано методику вхідного контролю якості присадного порошку сплаву ЖС32-ВИ в умовах серійного ремонтного виробництва, основу на визначенні середньовагового вмісту кисню та азоту за методикою відновного плавлення у потоці газу-носія та за критерієм оцінки середніх значень ефективної теплової потужності дуги та погонної енергії наплавлення при відновленні декількох лопаток-свідків та їхньої відповідності попередньо встановленому оптимальному діапазону.

Наведено аналіз перспектив подальшого застосування систем реєстрації і аналізу режимів наплавлення в умовах серійного ремонту деталей авіаційних газотурбінних двигунів з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів.

Ключові слова: мікроплазмове порошкове наплавлення, серійний ремонт робочих лопаток турбіни високого тиску (ТВТ), нікелевий жароміцний сплав ЖС32-ВИ, схильність до утворення тріщин, присадний порошок, наплавлений метал, вміст кисню та азоту, система реєстрації і аналізу режимів наплавлення, ефективна тепла потужність дуги, погонна енергія наплавлення.

ВСТУП

Більше 10 років на АТ «МОТОР СІЧ» для ремонту авіаційних робочих лопаток (РЛ) з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів (НЖС) з направленою структурою ЖС26-ВИ та ЖС32-ВИ (рис. 1, табл. 1), що належать до сучасних матеріалів авіаційно-космічного призначення та працюють в умовах експлуатації за температури 1000...1050 °С, успішно застосовується мікроплазмове порошкове наплавлення (МПН) на спеціалізованому обладнанні фірми «Кен-паметал Stellite» [4, 12]. В даному процесі використовується стиснена малоамперна дуга прямої полярності, в стовп якої вводиться присадний порошок з розмірами часток 63...160 мкм, що попередньо отримується шляхом сухого розпилення потоком аргону. Типовий приклад вигляду якісної (без утворення тріщин) структури зварного з'єднання «основний — наплавлений метал» наведено на рис. 1, в.

Серійне ремонтне виробництво ставить задачі з отримання стабільної якості відновлених деталей, зокрема — після відпрацювання ними кількох міжремонтних ресурсів. Однією з складових вирішення даної задачі є формування універсальних вимог до типових технологічних рішень при відновленні РЛ турбіни високого тиску (ТВТ) авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД) Д-18Т з НЖС ЖС32-ВИ з вмістом зміцнювальної γ' -фази понад 60 об. % способом МПН.

Відповідно, є актуальним формування уявлень про границі діапазону показників кількості тепловкладень у виріб, що є узагальненими параметрами даного процесу дугового наплавлен-

ня при відновленні розмірів бандажних полиць, і характеризують такий рівень і способи дозування тепловкладень у виріб, при яких одночасно забезпечуються якісне формування металу, що наплавляється, і технологічна міцність зварного з'єднання «основний — наплавлений метал». В свою чергу, під забезпеченням технологічної міцності на окремі РЛ ТВТ з НЖС ЖС32-ВИ в нашому випадку розумілася відсутність схильності до утворення тріщин як у процесі зварювання плавленням, так і при наступних термічних обробках, що притаманні важкозварюваному НЖС [9, 10, 20].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою даної роботи є викладення нових технологічних підходів, пов'язаних з оцінкою і зниженням кількості тепловкладень у виріб, та спрямованих на оптимізацію якості (зниження схильності до утворення тріщин) при серійному ремонті РЛ ТВТ авіаційного ГТД з важкозварюваного НЖС ЖС32-ВИ з напрацюванням більше 6...8 тис. год, що засновані на застосуванні системи реєстрації і аналізу режимів МПН.

Основні задачі для дослідження процесу МПН з неперервним подаванням присадного порошку зі сплаву ЖС32-ВИ в межах однієї номенклатури деталей, що ставилися в даній роботі:

— формування уявлень про взаємозв'язок узагальнених технологічних параметрів (ефективної теплової потужності дуги та погонної енергії) зі схильністю до утворення тріщин у зварних з'єднаннях «основний — наплавлений метал»;

— визначення оптимального діапазону даних енергетичних показників з метою його викорис-

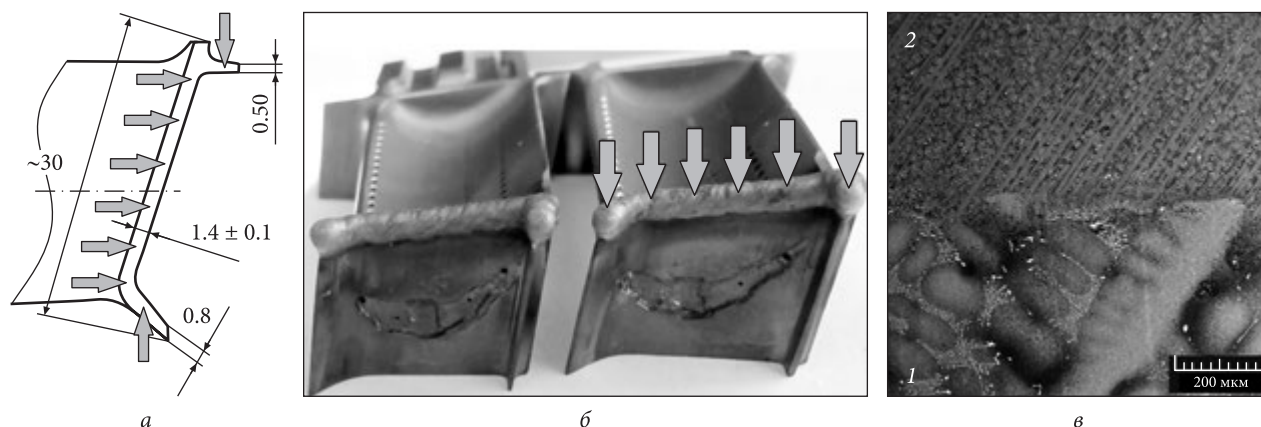


Рис. 1. Ескіз зони ремонту (а), зовнішній вид (б) РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з наплавленими торцями бандажних полиць (місце наплавлення вказано стрілками) та типовий вигляд зварного з'єднання «основний (1) — наплавлений метал (2)» сплаву ЖС32-ВИ в зоні ремонту (в) за даними растрової електронної мікроскопії

Таблиця 1. Вміст основних легуючих елементів у нікелевих жароміцних сплавах ЖС26-ВИ та ЖС32-ВИ

Сплав	Вар. %													
	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Re	Fe	B	V
ЖС26-ВИ	0.13... 0.18	4.3... 5.6	Осн.	8.0... 10.0	5.5... 6.2	0.8... 1.2	0.8... 1.4	11.0... 12.5	1.4... 1.8	—	—	—	—	0.8... 1.2
ЖС32-ВИ	0.12... 0.18	4.3... 5.6	Осн.	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	<0.02	—

тання при створенні програм режимів для наступної роботизації;

– аналіз перспектив застосування систем збору даних для вирішення актуальних задач серійного ремонту деталей авіаційних ГТД ручним та роботизованим наплавленням.

Відомо, що особливості зміни необхідної сили зварювального струму на локальній ділянці кромки РЛ у процесі її дугового наплавлення зумовлені технічними можливостями системи керування зварювальним струмом на спеціалізованому обладнанні [12, 18], а також її геометрією. Аналіз попередньо опублікованих робіт з технологічного застосування плазмових дуг прямої полярності [2, 4, 17, 18] свідчить про те, що для процесу МПН додатковими факторами варіювання стаціонарних параметрів режиму є діаметри каналів сопел і конструкція соплового вузла плазмотрону; витрати технологічних газів; склад захисного газу (система $Ag + (0...10\%) H_2$);

вид подавання присадного матеріалу; довжина дуги та ін. Вплив перерахованих факторів в умовах неперервного або періодичного технологічного керування силою зварювального струму ускладнює суб'єктивний аналіз як окремих режимів МПН, так і їхньої сукупності. Це, відповідно, значною мірою ускладнює встановлення взаємозв'язку з якістю зварних з'єднань «основний — наплавлений метал», що у першу чергу зумовлена відсутністю тріщин у зоні відновлювального ремонту РЛ. Тому актуальна необхідність формування нових підходів до об'єктивної оцінки технологічної множини режимів МПН, засновані на визначенні кількості теплової енергії, введеної у виріб-анод за час горіння мікроплазмової дуги.

В нашому випадку об'єктом дослідження була технологія серійного ремонту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з експлуатаційним напрацюванням більше 6...8 тис. год. Предметом дослід-

жень — зареєстровані за час виконання t одношарового наплавлення торців бандажних полиць цих РЛ циклограми сили зварювального струму $i(t)$, а також взаємозв'язок їхніх узагальнених показників з кількістю придатних та бракованих (за критерієм наявності тріщин) РЛ, визначених капілярним контролем ЛЮМ-10В в кінці технологічного циклу відновлювального ремонту. Попередній виробничий досвід показав, що для зазначених РЛ у процесі їхнього подальшого відновлювального ремонту із застосуванням способу МПН суттєво зростає схильність до утворення тріщин. Більшість з них виявлялося капілярним контролем ЛЮМ-10В тільки після проходження повного циклу технологічних операцій (МПН, термічна та механічна обробка та ін.), через 2-3 тижні після виконання наплавлень, що негативно впливало на ритмічність та ефективність роботи ремонтного виробництва. Ймовірно, погіршення зварюваності сплаву ЖС32-ВИ пов'язане з попередньо встановленим [5] збагаченням його γ' -фази тугоплавкими елементами W, Re, Ta, Cr при збільшенні тривалості експлуатації РЛ ТВТ на авіаційному ГТД Д-18Т та попередньо встановленою більшою чутливістю до утворення тріщин району лінії сплавлення зварного з'єднання «основний — наплавлений метал» порівняно з безпосередньо наплавленим металом [16]. Наведені нижче дослідження ґрунтувалися на припущенні про можливість вирішення поставленої задачі підвищення стабільності якості серійного ремонту шляхом введення більш жорстких вимог до режимів МПН, порівняно з попередньо відомими обмеженнями середньої сили зварювального струму ($\bar{I}_d < 20$ А, [14]), що попередньо застосовувалися для відновлення даних РЛ ТВТ з експлуатаційним напруженням менше 6...8 тис. год.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для реєстрації режимів МПН РЛ ТВТ зі сплаву ЖС32-ВИ використовувалася система збору даних у складі: безконтактного давача струму фірми LEM ($I_{\text{ном}} = 100$ А), розташованого на ділянці зварювального контуру «+» джерела живлення — виріб; давача напруги фірми LEM з гальванічною розв'язкою контуру, що дозволяв

з високою точністю вимірювати напругу в діапазоні 20...30 В; аналого-цифрового перетворювача (АЦП) m-DAQ14, що дозволяв здійснювати реєстрацію зварювального струму та напруги з частотою 1...10 кГц та загальною тривалістю до 200...250 с; ноутбука для збереження у вигляді цифрового ряду записаних файлів режимів МПН та їхньої подальшої обробки та аналізу.

При первинній обробці осцилограм зварювального струму і напруги сигнали амплітудою до 2 В, виміряні у зварювальному контурі за допомогою датчиків з гальванічною розв'язкою безпосередньо у процесі МПН РЛ і записані у вигляді цифрового ряду, перемножувалися на попередньо встановлений калібрувальний коефіцієнт. Таким чином визначалися і візуально аналізувалися залежності $i(t)$ та $U(t)$, а також з прийнятною точністю встановлювалося значення часу t , витрачене на безпосередньо процес наплавлення бандажної полиці РЛ. Зовнішній вигляд фрагменту осцилограми зварювального струму установки STARWELD PTA 190H після її первинної обробки наведено на рис. 2, а.

Встановлено, що типова осцилограма зварювального струму при відпрацьованих режимах ручного одношарового наплавлення бандажної полиці має вигляд нестационарного періодичного процесу тривалістю до 100...150 с. Практично такий режим реалізується зварювальником-оператором шляхом накладення періодичних керівних дій через пульт дистанційного керування на вихідний стаціонарний режим горіння імпульсної мікроплазмової дуги. Реалізація таких достатньо складних режимів викликана необхідністю прецизійного дозування теплової енергії малоамперної дуги у процесі наплавлення шару металу висотою 2...3 мм для забезпечення наведених нижче характеристик наплавленого валика в різних локальних зонах торця бандажної полиці РЛ, зокрема при зміні ширини її поверхні. Це утримання зварювальної мікрованни на поверхні торця бандажної полиці, що наплавляється в умовах вільного формування, зокрема шляхом зменшення глибини проплавлення основного металу (не більше 1.5 мм). А також обмеження ширини мікрованни і, відповідно, бокових підсиленнь наплавленого валика, у ме-

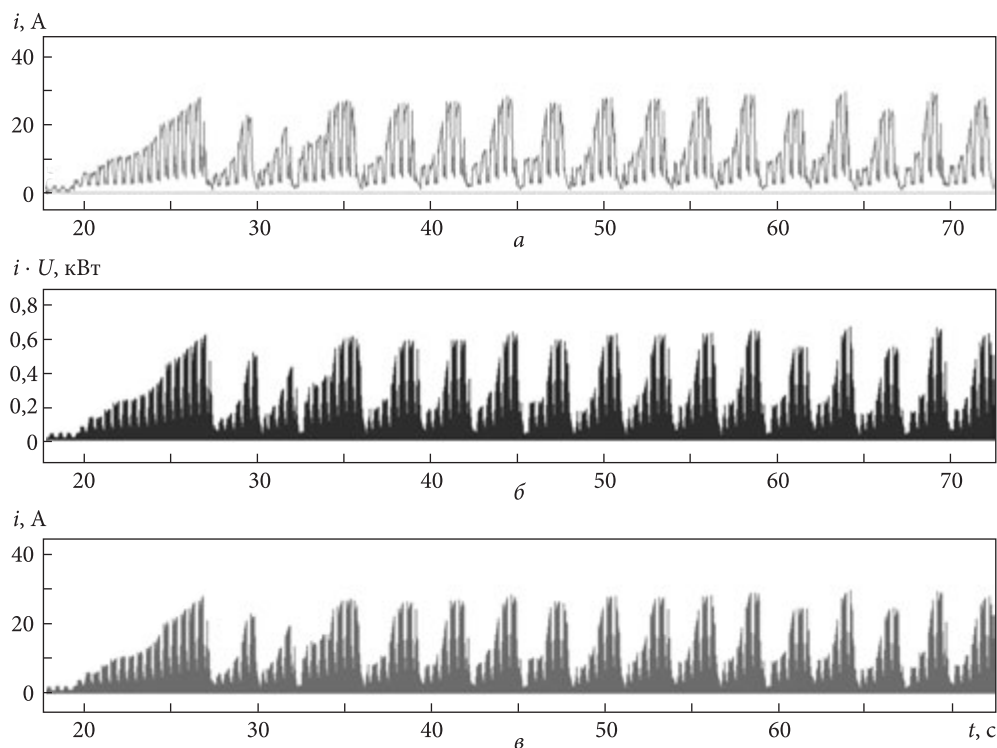


Рис. 2. Фрагменти запису режиму при відновленні торця бандажної полиці РЛ ТВТ авіаційного двигуна Д-18Т при-
садним порошком сплаву ЖС32-ВИ: *a* — зареєстрований зварювальний струм після первинної обробки; *б, в* — гео-
метричне визначення об'єктивних показників $\int_0^t i(t) \cdot U(t) dt$ та $\int_0^t i(t) dt$ на основі визначеного інтегралу за часом *t*

жах до 0.5...1.5 мм на сторону (див. рис. 1, *б*), виходячи з ряду технологічних міркувань — зокрема зниження трудомісткості подальшої механічної обробки наплавленого валика.

Попередні дослідження [16, 18] показали, що погонна енергія є важливою узагальненою характеристикою режимів МПН при відновленні НЖС вузької основи [17]. Для відповідних зварних з'єднань «основний — наплавлений метал» сплаву ЖС32-ВИ цей показник достатньо однозначно визначає схильність до утворення тріщин в процесі наплавлення та наступної термічної обробки.

Аналіз зареєстрованих осцилограм параметрів режимів наплавлення РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т показав, що об'єктивними (отриманими цифровою обробкою зареєстрованого сигналу) показниками кількості теплової енергії, внесеної у виріб при реалізації процесу МПН, можуть бути:

1) діюче (ефективне) значення сили зварювального струму:

$$\bar{I}_d = \sqrt{\frac{\int_0^t i(t) dt}{t}} \text{ [A]}, \quad (1)$$

2) визначений інтеграл електричної потужності мікроплазмової дуги (кількість електричної енергії, витраченої на її горіння у процесі наплавлення тривалістю *t*):

$$Q^E = \int_0^t i(t) \cdot u(t) dt \text{ [Дж]}, \quad (2)$$

3) визначений інтеграл сили зварювального струму (кількість електричного заряду, що пройшов через дуговий проміжок катод — анод в процесі наплавлення тривалістю *t*):

$$Q^I = \int_0^t i(t) dt \text{ , [A} \cdot \text{c]}, \text{ або [Кл]} \quad (3)$$

з огляду на те, що для мікроплазмової дуги у досліджуваному діапазоні зварювальних струмів $I_d = 1...35$ А спостерігається наступна закономірність $\Delta U \ll \Delta I$ та $U(t) \approx 22.5$ В. Графічну інтерпретацію визначених інтегралів [1] електричної потужності мікроплазмової дуги та зварювального струму представлено на рис. 2, б, в у вигляді площі фігури під відповідними залежностями у часі.

Середню погонну енергію на основі повної електричної дуги при МПН РЛ ТВТ можна при відомій довжині L наплавленого валика можна визначити з виразу

$$\frac{\overline{U \cdot I}}{v} = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t \frac{i(t) \cdot u(t)}{v(t)} dt = Q^E / L. \quad (4)$$

Практичний інтерес з точки зору дослідження взаємозв'язку між кількістю тепловкладень у виріб Q_Σ і схильністю до утворення тріщин становить уточнення величини середньої погонної енергії q_b / v з урахуванням ефективного ККД нагріву виробу η_b [16–18] для умов МПН РЛ:

$$Q_\Sigma = \eta_b \cdot Q^E, \quad (5)$$

$$\overline{q_b / v} = Q_\Sigma / L. \quad (6)$$

Згідно з теорією теплових процесів при зварюванні М. М. Рикаліна [8] ефективна теплова потужність q_b характеризує певну частину електричної потужності дуги, що витрачається в одиницю часу на нагрівання виробу. З урахуванням адитивності тепловкладень їхня кількість визначається як

$$Q_\Sigma = \int_0^t q_b(t) dt, \quad (7)$$

або

$$Q_\Sigma = q_b t \text{ при } i(t) = \text{const}. \quad (8)$$

Відомо [2, 3, 6–8, 17, 18], що $q_b = f(I)$. Для стиснених дуг прямої полярності у межах діапазону зварювальних струмів, обмеженого значеннями мінімального струму стабільного горіння дуги I_{\min} та максимального струму I_{\max} , при якому забезпечується тепловий режим роботи плазмотрона $PB = 100\%$, ефективну теплову потужність дуги прийнято апроксимувати лінійною залежністю [2, 3, 6–8, 17, 18]:

$$q_b = k_q \bar{I} + c_q \text{ [Вт]}, \quad (9)$$

де \bar{I} — середнє значення сили зварювального струму, k_q і c_q — коефіцієнти лінійної апроксимації, обчислені на основі експериментальних даних з проточного калориметрування стисненої дуги на водоохолоджуваному мідному аноді [2]. Для умов процесу МПН (від $\bar{I} = 1...2$ А до $\bar{I} = 30...35$ А) використання лінійної апроксимації функції $q_b = f(I)$ дає такі переваги:

- достатньо просте і однозначне експериментальне визначення коефіцієнтів k_q і c_q за методикою проточного калориметрування [2, 17] практичного для будь-якого набору стаціонарних технологічних параметрів мікроплазмової дуги;
- збереження для імпульсного зварювального струму в діапазоні частот 0.3...3.0 Гц властивості адитивності теплової енергії, що дозволяє визначати загальні тепловкладення у виріб як сукупну дію імпульсів та пауз;

- обмеження систематичних відхилень значенням $+10\%$ між оціненими за методикою проточного калориметрування і реальними тепловкладеннями у виріб у процесі МПН [19] і в однакових умовах горіння мікроплазмової дуги.

Виходячи з фізичного сенсу ефективної теплової потужності дуги (7)–(9), величину тепловкладень у виріб і середню погонну енергію з урахуванням ефективного ККД нагріву за час t горіння дуги можна визначити як

$$Q_\Sigma = \int_0^t q_b(t) dt = k_q \int_0^t i(t) dt + c_q t, \quad (10)$$

$$\overline{q_b / v} = \int_0^t q_b(t) dt / L = \left(k_q \int_0^t i(t) dt + c_q t \right) / L, \quad (11)$$

або, у випадку $I = \text{const}$:

$$Q_\Sigma = \bar{q}_b t, \quad (12)$$

$$\overline{q_b / v} = Q_\Sigma / L. \quad (13)$$

Слід відзначити, що визначення кількості тепловкладень у виріб за цифровим рядом зварювального струму у вигляді складної кусково-неперервної визначеної функції $i(t)$, що є сукупністю дискретних значень $i_1(\tau_1)$, $i_2(\tau_2)$, ..., $i_n(\tau_n)$, отриманого шляхом реєстрації з заданою частотою АЦП $f = t/n$, згідно з [1] є частковим випадком для залежності (11).

Запропонований алгоритм цифрової обробки режимів наплавлення для визначення кількості тепловкладень у виріб базується на розрахунках об'єктивного параметра процесу МПН — визначеного інтеграла сили зварювального струму $\int_0^t i(t)dt$, що характеризує кількість електричного заряду, який пройшов через дуговий проміжок катод — анод за час горіння дуги. Геометричний сенс такого інтегралу [1] (див. рис. 2, в) — площа фігури, обмежена залежністю $i(t)$, є інтуїтивно зрозумілим технологу через прямий вплив на кількість тепловкладень у виріб амплітуди зварювального струму та тривалості наплавлення.

Для зареєстрованого режиму МПН РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т, крім визначення погонної енергії (11), (13), також розраховувалися середні значення електричної та ефективної теплової потужності мікроплазмової дуги:

$$\overline{U \cdot I} = Q^E / t,$$

$$\overline{q_b} = Q_\Sigma / t.$$

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

З метою формування уявлень про взаємозв'язок між кількістю тепловкладень у виріб при МПН, що відповідно характеризуються рядом зазначених вище показників та схильністю до утворення тріщин у зварному з'єднанні «основний — наплавлений метал» при серійному ремонті РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т зі сплаву ЖС32-ВИ з напрацюванням більш ніж 6...8 тис. год, було виконано такі технологічні дослідження. У виробничих умовах АТ «МОТОР СІЧ» з викорис-

танням присадного порошку сплаву ЖС32-ВИ однієї партії (фракція +63...-160 мкм) виконувалось відновлювальне наплавлення торців бандажних полиць зазначених РЛ на чотирьох дослідних моторокомплектах з послідовним збільшенням діючого значення сили зварювального струму. Такі РЛ мали приблизно однакове напрацювання на двигуні Д-18Т, ідентичні геометричні розміри зони ремонту та, відповідно, наплавленого валика; всі інші технологічні параметри МПН не змінювалися. При цьому за викладеною вище методикою вибірково реєструвалися ($\approx 10\%$ РЛ з 128 шт. моторокомплекту) та аналізувалися режими МПН. Після проведення повного циклу технологічних операцій РЛ проходили фінішний капілярний контроль ЛЮМ-10В, який на деяких з них виявляв тріщини та несплавлення. Бракованими вважалися ті РЛ, на яких в зоні ремонту наплавленням було виявлено хоча б один з вказаних дефектів.

Використання викладених вище методик розрахункового визначення узагальнених енергетичних показників режиму МПН, що характеризують кількість тепловкладень у виріб за час його проведення, дозволило з прийнятною точністю і оперативністю проаналізувати нестационарні режими наплавлення РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т зі сплаву ЖС32-ВИ (рис. 2—4). Узагальнені результати такого аналізу та показники їхнього взаємозв'язку з показниками зварюваності (відносна кількість та вид браку) наведено в табл. 2.

Встановлено, що у межах сукупності діапазонів даних енергетичних показників спостерігається лінійна залежність, ранжована віднос-

Таблиця 2. Взаємозв'язок діапазонів енергетичних показників режимів МПН (див. позначення в тексті) з відносною кількістю браку у процесі ремонту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т зі сплаву ЖС32-ВИ з напрацюванням понад 6...8 тис. год

Номер моторокомплекту	\bar{I}_r, A	$\overline{U \cdot I} / v, Дж/мм$	$Q^I, A \cdot c$	$\overline{U \cdot I}, Вт$	$\overline{q_b}, Вт$	$\overline{q_b} / v, Дж/мм$	Показники браку	
							частка кількості лопаток у моторокомплекті, %	види браку
1	7...9	340.3...442.3	529.2...687.6	115.4...159.7	95.4...125.5	259.2...341.3	27.3	несплавлення
2	10...12	493.2...587.1	763.2...932.4	167.2...199.0	140.6...173.8	382.3...469.2	3.1	тріщини
3	12...14	595.2...684.0	946.8...1101.6	201.8...239.4	177.1...208.5	477.7...562.2	15.6	тріщини
4	14...16	697.2...799.1	1116.0...1288.8	236.4...288.5	206.4...235.6	562.2...656.7	58.6	тріщини

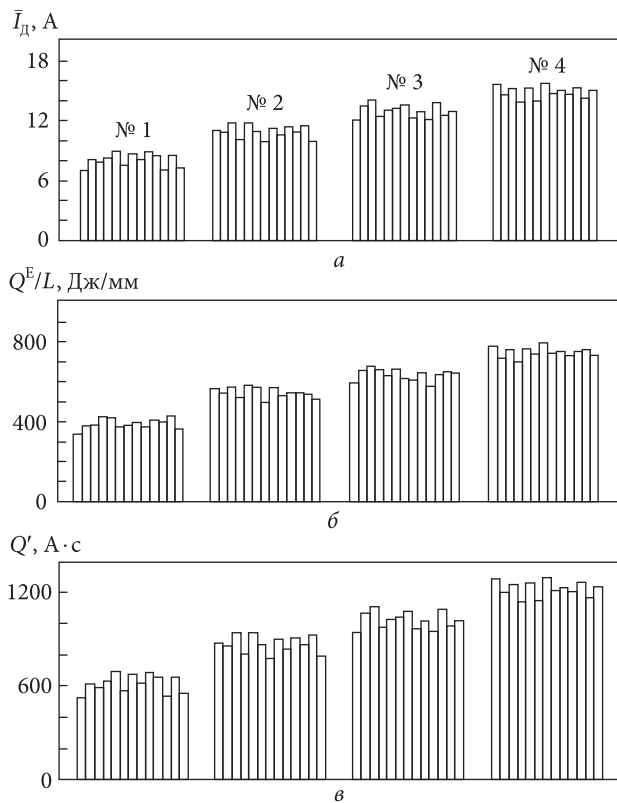


Рис. 3. Особливості розподілу об’єктивних енергетичних показників режимів наплавлення в залежності від умовного порядкового номеру відновленого моторокомплекту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т згідно з табл. 2: *a* — усередненого діючого значення \bar{I}_d сили зварювального струму; *b* — погонної енергії при формуванні 1 мм наплавленого валика $Q^E/L = \int_0^t i(t) \cdot U(t) dt / L$; *v* — питомої кількості заряду $Q^I = \int_0^t i(t) dt / L$, що пройшов крізь електричний проміжок катод — анод мікроплазмової дуги

Таблиця 3. Вміст кисню і азоту в наплавленому металі ЖС32 для різних партій відповідного присадного порошку, визначений за методикою відновного плавлення у потоці газу-носія

Номер партії	Кисень, ваг. %	Азот, ваг. %
1	0.00900...0.01450	0.00314...0.00362
2	0.01050...0.01340	0.00414...0.00506
3	0.00533...0.00618	0.00106...0.00121
4	0.02860...0.03760	0.00426...0.00623
5	0.00589...0.00694	0.00108...0.00123

но порядкового номеру моторокомплекту (див. табл. 2 та рис. 4). В середині кожного моторокомплекту відмічено менший розмах варіювання експериментальних даних, зумовлений, ймовірно, впливом ручного процесу (зварювальний струм, довжина дуги, поперечний переріз валика та швидкість наплавлення) або індивідуальними конструктивними особливостями поверхні під наплавлення (ширина бандажної полиці).

Таким чином, встановлено, що найбільша частка виходу якісних РЛ після МПН бандажних полиць забезпечується для моторокомплекту № 2 при середніх значеннях ефективної теплової потужності дуги $\bar{q}_B = 140...175$ Вт і погонної енергії наплавлення $\bar{q}_B / v = 380...470$ Дж/мм. В цих технологічних умовах спостерігалось як надійне сплавлення наплавленого металу з основним, так і мінімальна схильність аналізованого зварного з’єднання сплаву ЖС32-ВИ до утворення тріщин. При збільшенні середніх значень \bar{q}_B і \bar{q}_B / v у 1.36...1.47 раза порівняно з встановленим оптимальним діапазоном (моторокомплект № 2) у зварному з’єднанні «основний — наплавлений метал» сплаву ЖС32-ВИ відмічається значне підвищення схильності до утворення тріщин (див. табл. 2).

Отримані дані з взаємозв’язку узагальнених параметрів режиму МПН та статистики проявів схильності до утворення тріщин для даного типу РЛ надалі були використані при технологічному аналізі якості п’ять партій присадного порошку сплаву ЖС32-ВИ, поставленого на АТ «Мотор Січ». Всі партії цього порошку мали однаковий гранулометричний склад (в межах фракції +63...-160 мкм) та за вмістом легуючих елементів відповідали вимогам ТУ 1-91-177-92 на відповідний НЖС. Проте при їхньому входному контролі в наплавленому металі ЖС32 для кожної партії присадного порошку було встановлено різний вміст кисню та азоту (табл. 3). На момент проведення дослідно-практичних робіт, висвітлених в даній роботі, гранично допустимий вміст [O] і [N] в нормативно-технічній документації на присадний порошок та наплавлений метал не регламентувався.

Відомо, що взаємодія основних γ' -утворювальних елементів НЖС (Al, Ti, Nb, Ta, Hf), а

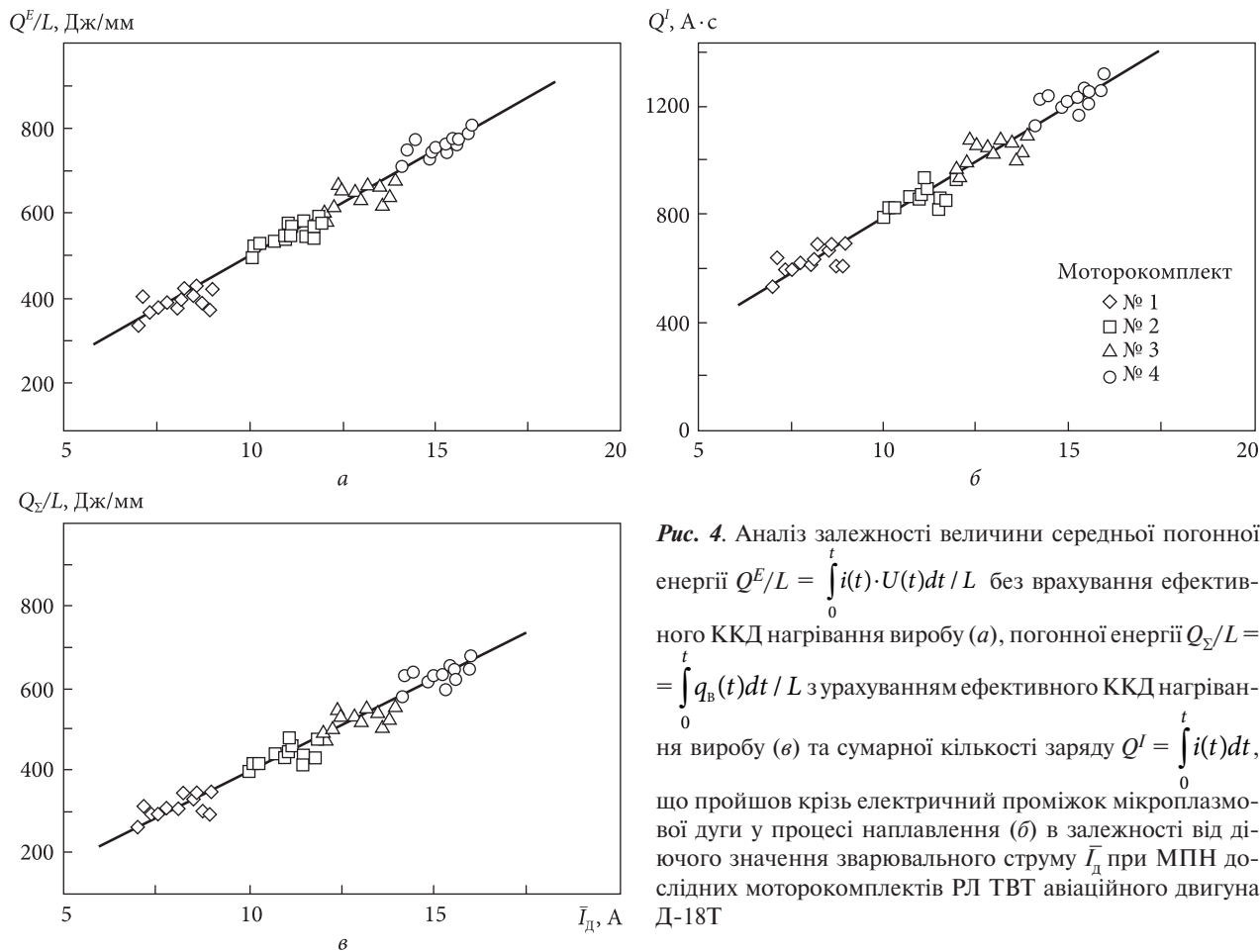


Рис. 4. Аналіз залежності величини середньої погонної енергії $Q^E/L = \int_0^t i(t) \cdot U(t) dt / L$ без врахування ефективного ККД нагрівання виробу (а), погонної енергії $Q_z/L = \int_0^t q_b(t) dt / L$ з урахуванням ефективного ККД нагрівання виробу (в) та сумарної кількості заряду $Q^I = \int_0^t i(t) dt$, що пройшов крізь електричний проміжок мікроплазмової дуги у процесі наплавлення (б) в залежності від діючого значення зварювального струму I_d при МПН дослідних моторокомплектів РЛ ТВТ авіаційного двигуна Д-18Т

також інших легуючих елементів (наприклад Сг, W) з киснем при зварюванні плавленням призводить до утворення тугоплавких оксидів [11, 19] через їхню високу спорідненість до цього хімічного елемента при високотемпературному нагріві [7]. У ряді робіт [11, 15] відмічається, що наявність таких тугоплавких оксидів у розплавленому металі і на поверхні зварювальної ванни вимагає підвищення тепловкладень у виріб для забезпечення при формуванні зварних з'єднань ЖНС прийняттого розтікання наплавленого металу та його змочуваності з основним.

Через пряму залежність між збільшенням кількості тепловкладень у виріб та підвищенням схильності до утворення тріщин при зварюванні плавленням НЖС та їхній наступній термічній обробці, як підтверджений в даній роботі експериментально, так і відомої з ряду інших ро-

біт [16, 17, 20], актуально додаткове уточнення критеріїв технологічної придатності присадного порошку ЖС32 для умов малоамперної МПН при серійному ремонті РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т, зокрема — з напрацюванням понад 6... 8 тис. год. З огляду на попередньо встановлені факти припускалося, що в аналізованій області параметрів режимів МПН РЛ з важкозварюваного сплаву ЖС32-ВИ також є подібний зв'язок між вихідним вмістом кисню, азоту в присадному порошку ЖС32 (опосередковано характеризується вмістом цих домішок далі у наплавленому металі) та кількістю тепловкладень у виріб, необхідних для нормального формування валика наплавленого заданого поперечного перерізу.

Для встановлення ступеня придатності партії присадного порошку сплаву ЖС32-ВИ для відновлення РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т спосо-

бом МПН у виробничих умовах запропоновано оцінювати її шляхом декількох контрольних лопаток-свідків. За викладеною в даній роботі методикою визначали теплову ефективну потужність мікроплазмової дуги та погонну енергію МПН з урахуванням ефективного ККД нагріву виробу. Надалі порівнювали визначені величини з попередньо встановленими «типовими» діапазонами параметрів МПН, зокрема з тим, у якому схильність до утворення тріщин при МПН РЛ зі сплаву ЖС32-ВИ проявляється мінімально (табл. 4).

Отримані результати дозволили зробити ряд висновків. Підвищення кількості тепловкладень у виріб при МПН РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням більше 6...8 тис. год у 1.5 раза і більше порівняно з оптимальним діапазоном (див. табл. 2, режим 2) вже є критичним, оскільки супроводжується значним збільшенням випадків виявлення тріщин. Такі підвищені витрати тепла при формуванні валика заданого перерізу корелюють зі збільшенням в наплавленому металі ЖС32 вмісту кисню більше 0.010 ваг. % і азоту більше 0.004 ваг. %. В свою чергу це є наслідком застосування недостатньо якісного присадного порошку ЖС32 з середньоваговим вмістом кисню та азоту відповідно 0.0380 ваг. % і 0.0040 ваг. % (партія № 4). Оптимальні тепловкладення при МПН спостерігаються при застосуванні присадного порошку зі значно меншим вмістом кисню та азоту — відповідно 0.0055 ваг.% і 0.001 ваг. % (партія № 3).

Сучасний рівень розвитку робототехніки у зварювальному виробництві однозначно свідчить про економічні та технологічні переваги заміни ручних та автоматичних процесів. Але у виробничих умовах фактична реалізація переходу до роботизованих систем МПН у першу чергу обмежується недостатнім рівнем сформованих уявлень про необхідні технологічні вимоги до відповідних методик попереднього вибору режимів наплавлення. Отримані результати із взаємозв'язку узагальнених параметрів режиму наплавлення та схильності до утворення тріщин (див. табл. 2—4) були використані для роботизації процесу МПН РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т на установці STARWELD 190R.

Спочатку режим МПН для роботизованого наплавлення зазначених лопаток був підібраний, виходячи з необхідної форми і розмірів поперечного перерізу наплавленого валика і стабільного формування зварювальної ванни. Аналіз за викладеною в даній роботі методикою показав, що вихідний режим МПН відповідав діапазонам ефективної потужності мікроплазмової дуги $\overline{q_B} = 193...197$ Вт та погонної енергії $\overline{q_B / v} = 505...511$ Дж/мм, що відповідали умовам наплавлення моторокомплектів № 1-2 (див. табл. 4). Надалі була проведена додаткова корекція режиму шляхом зниження приблизно на 10 % величини зварювального струму та витрат присадного порошку ЖС32. В результаті для нового режиму

Таблиця 4. Особливості прогнозування схильності до утворення тріщин у процесі ремонту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т на основі типових діапазонів енергетичних показників режимів МПН при оцінці різних партій присадного порошку ЖС32

№ партії	Присадний порошок		МПН РЛ-свідків		Встановлені закономірності схильності до утворення тріщин			Для відновлення моторо-комплектів РЛ з напрацюванням*
	[O], ваг.%	[N], ваг. %	$\overline{q_B}$, Вт	$\overline{q_B / v}$, Дж/мм	«типовий» діапазон		рівень браку у відновленому моторокомплекті РЛ	
					$\overline{q_B}$, Вт	$\overline{q_B / v}$, Дж/мм		
1	—	—	183...196	480...520	177...209	478...562	15.6 %	до 6...8 тис. год
2	—	—	191...204	490...538	177...209	478...562	15.6 %	до 6...8 тис. год
3	0.0055	0.0010	145...160	380...410	141...174	382...469	3.1 %	більше 6...8 тис. год
4	0.0380	0.0040	227...249	640...670	206...236	562...657	>58.6 %	забракувати
5	—	—	149...165	388...423	141...174	382...469	3.1 %	більше 6...8 тис. год

Примітка: *— прийняте технологічне рішення стосовно поставленої партії присадного порошку ЖС32.

були встановлені діапазони $\bar{q}_b = 163...168$ Вт та $q_b / v = 409...417$ Дж/мм, що практично відповідає кількості тепловкладень у виріб при МПН моторокомплектів № 3, 5 (див. табл. 4).

При скоригованих режимах на роботизованій установці STARWELD 190R був наплавлений моторокомплект РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням понад 6...8 тис. год. Після проходження повного циклу механічної і термічної обробки відновленого способом МПН моторокомплекту на заключній операції капілярного контролю ЛЮМ 1-ОВ тріщин в зоні ремонту РЛ не виявлено. Таким чином, обраний за описаною в даній роботі методикою режим роботизованого наплавлення забезпечив максимальний вихід якісних лопаток в даному моторокомплекті.

Опробування роботизованого наплавлення дослідного моторокомплекту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням більш ніж 6...8 тис. год показало такий технологічний ефект порівняно з ручним процесом МПН: підвищення стабільності якості ремонту при автоматичному відтворенні оптимальних параметрів наплавлення; зниження вимог до кваліфікації зварювальника-оператора; зменшення витрат часу на наплавлення моторокомплекту орієнтовно у 2...2.5 рази.

Аналіз результатів дослідної роботи показав, що запропонований новий технологічний підхід для певної типової конфігурації відновлюваної поверхні РЛ з НЖС ЖС32-ВИ забезпечує можливість на основі аналізу відносно невеликої вибірки режимів МПН (≈ 50 шт.) об'єктивно встановити границі оптимального діапазону енергетичних показників процесу. Його нижня межа визначається такою кількістю питомих тепловкладень у виріб, при яких гарантовано забезпечується якісне формування наплавленого металу, це у першу чергу є відсутність несплавлень. Верхня межа є такою кількістю питомих тепловкладень у виріб, при яких гарантовано забезпечується відсутність або мінімальна схильність зони ремонту до утворення тріщин як у процесі наплавлення, так і при наступних термічних обробках.

Результати промислового опробування викладеного в даній роботі технологічного підходу показали, що отримані дані з оптимальних діапазонів енергетичних параметрів процесу МПН

сплаву ЖС32-ВИ можуть бути основою для створення і подальшої оптимізації відповідних програм для наплавлення РЛ на роботизованому обладнанні. Також даний підхід в найближчій перспективі сприятиме створенню в умовах серійного ремонтного виробництва універсальних баз даних з діапазонів енергетичних параметрів процесу, що дозволяють гарантувати якість зварного з'єднання «основний — наплавлений метал» важкозварюваних НЖС і мінімальний рівень виробничого браку відновлених деталей авіаційних ГТД з таких матеріалів. Це надасть можливість для деталей зі складною геометрією зони ремонту швидко і з мінімальними витратами ресурсів здійснювати розробку, впровадження та корекцію технології МПН в умовах варіювання ряду технологічних факторів виробництва, а саме: розміри і форма деталі; тривалість її попередньої експлуатації; якість дисперсної присадки; відмінні моделі плазмотронів, спеціалізованих джерел живлення і пристроїв для подавання присадного порошку.

Викладений матеріал також підтверджує принципову можливість створення для серійного наплавлення РЛ авіаційних ГТД спеціалізованих програм контролю і прогнозування якості в онлайн-режимі, заснованих на автоматичній обробці зареєстрованих даних дискретного «поточку» режимів МПН.

ВИСНОВКИ

1. Для оптимізації якості ремонту і трудовитрат при серійному відновленні бандажних полиць РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з обмежено зварюваного НЖС ЖС32-ВИ у виробничих умовах АТ «МОТОР СІЧ» опробувано розроблений в ІЕЗ ім. Є. О. Патона новий технологічний підхід. Він ґрунтується на визначенні кількості тепловкладень у виріб при використанні системи реєстрації і аналізу зварювального струму та встановленні співвідношень між ними і кількісними показниками схильності до утворення тріщин у зварному з'єднанні «основний — наплавлений метал» важкозварюваного НЖС типової відновленої деталі авіаційного ГТД.

2. Для аналізу і контролю режимів МПН із застосуванням присадного порошку ЖС32 при

відновленні кромки бандажних полиць РЛ використано наступні експериментальні та розрахункові енергетичні критерії: визначений інтеграл зварювального струму (за часом); ефективна теплова потужність дуги та погонна енергія наплавлення з використанням ефективного ККД нагріву виробу.

3. На основі статистичної обробки режимів наплавлення РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням більше 6...8 тис. год і співвідношення їх з даними про схильність до утворення тріщин в зоні ремонту встановлено оптимальний діапазон енергетичних параметрів МПН, де вихід якісних РЛ перевищує 97 % від загальної вхідної їхньої кількості: ефективна теплова потужність мікроплазмової дуги — 140...175 Вт, погонна енергія наплавлення — 380...470 Дж/мм.

4. Встановлено, що підвищення середньовагового газовмісту кисню і азоту у присадному порошку ЖС32 у межах $[O] = 0.0055...0.0380$ ваг. % та $[N] = 0.001...0.004$ ваг. % викликає необхідність збільшення кількості тепловкладень у виріб у процесі МПН орієнтовно у 1.5 раза порівняно із оптимальним діапазоном параметрів, що суттєво знижує опірність до утворення

тріщин при відновлювальному ремонті РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням більше 6...8 тис. год.

5. Результати проведених дослідно-практичних робіт показали доцільність здійснення вхідного контролю середньовагового вмісту кисню та азоту у присадному порошку ЖС32, а також його довиробничого тестування, що передбачає оцінку енергетичного «відгуку» такої дисперсної присадки при формуванні наплавленого валика і аналогічний контроль цих домішок у наплавленому металі.

6. Отримані дані дозволили в умовах виробництва АТ «МОТОР СІЧ» для РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з різним терміном напрацювання оптимізувати технологію МПН за критеріями якості дисперсної присадки ЖС32 і відповідності режимів наплавлення декількох лопаток-свідків встановленому оптимальному діапазону. Це дозволило уникнути масового браку при відновлювальному ремонті зазначених лопаток з напрацюванням більше 6...8 тис. год ручним МПН, а також підібрати режими відповідного роботизованого МПН без утворення тріщин в зоні ремонту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. *Справочник по математике* (Для инженеров и учащихся ВТУЗов, 11-е изд.). Москва: Наука, 1967. 608 с.
2. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. *Плазменная наплавка*. Київ: Екотехнологія, 2007. 292 с.
3. Демьянцевич В. П., Михайлов Н. П. Составляющие теплового баланса микроплазменной дуги. *Автомат. сварка*. 1973. № 8. С. 25—27.
4. Жеманюк П. Д., Петрик И. А., Чигилейчик С. Л. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. *Автомат. сварка*. 2015. № 8. С. 43—46.
5. Лесников В. П., Кузнецов В. П., Мороз Е. В., Пейчев Г. И., Замковой В. Е., Андрейченко Н. В. Стабильность сплава ЖС32-ВИ после высокотемпературных выдержек и эксплуатации на двигателе Д-18Т. *Газотурбинные технологии*. 2007. № 8 (октябрь). С. 40—42.
6. Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С., Дудко Д. А. и др. *Микроплазменная сварка*. Киев: Наук. думка, 1979. 248 с.
7. Петров Г. Л., Тумарев А. С. *Теория сварочных процессов*. Москва: Высш. шк., 1967. 508 с.
8. Рыкалин Н. Н. *Расчеты тепловых процессов при сварке*. Москва: Машгиз, 1951. 296 с.
9. Симс Ч., Столлов Н., Хагель В. *Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок*. Пер. с англ. Под ред. Р. Е. Шалина. Москва: Металлургия, 1995. 384 с.
10. Сорокин Л. И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов. *Сварочное пр-во*. 1999. № 12. С. 11—17.
11. Сорокин Л. И. Заварка трещин с окисленной поверхностью на жаропрочных никелевых сплавах. *Сварочное пр-во*. 2004. № 12. С. 30—31.
12. Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье. *Автомат. сварка*. 2010. № 1. С. 59—62.

13. Цинке М., Нойберт Г., Герольд Х. Свойства сварных соединений жаропрочных сплавов на основе никеля. *Автомат. сварка*. 1999. № 4. С. 35—38.
14. Ющенко К. А., Савченко В. С., Яровицын А. В., Наконечный А. А., Настенко Г. Ф., Замковой В. Е., Белозерцев О. С., Андрейченко Н. В. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки. *Автомат. сварка*. 2010. № 8. С. 25—29.
15. Ющенко К. А., Яровицын А. В. Влияние содержания активных газов и сплошности дисперсной присадки на процесс формирования валика при микроплазменной порошковой наплавке никелевых жаропрочных сплавов. *Автомат. сварка*. 2014. № 6-7. С. 119—128.
16. Ющенко К. А., Яровицын А. В., Червяков Н. О. Влияние энергетических показателей режимов на склонность к образованию трещин при микроплазменной порошковой наплавке никелевого сплава ЖС32. *Автомат. сварка*. 2017. № 2. С. 3—7.
17. Яровицын О. В. *Мікроплазмове порошкове наплавлення жароміцних нікелевих сплавів з вмістом γ' -фази 45—65 %*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2009. 21 с.
18. Яровицын А. В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки. *Автомат. сварка*. 2015. № 5-6. С. 18—25.
19. Яровицын А. В., Новиков С. В. *Методическое обеспечение погружного калориметрирования малоамперных дуг*. 36 тез. до V Всеукраїнської науково-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології» (ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 27—29 травня 2009 р.). Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2009. С. 124.
20. Lippold J. C., Kiser S. D., DuPont J. N. *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. Hoboken, New Jersey: John Wiley&Sons, Inc., 2009. 456 p.

REFERENCES

1. Bronstein I. N., Semendiajev K. A. (1967). *Mathematics handbook* [For engineers and technical university students, 11th publ.]. Moscow: Science, 608 p.
2. Gladkiy P. V., Perepletchikov E. F., Ryabtsev I. A. (2007). *Plasma cladding*. Kiyv: Ecotechnology, 292 p.
3. Demjantsevich V. P., Mykhailov N. P. (1973). Micro-plasma arc heat balance components. *Autom. welding*, № 8, 25—27.
4. Zhemanyuk P. D., Petrik I. A., Chygyleichyk S. L. (2015). Experience of introduction of the technology of reconditioning microplasma powder surfacing at repair of high-pressure turbine blades in batch production. *Autom. welding*, № 8, 43—46.
5. Lesnikov V. P., Kuznetsov V. P., Moroz E. V., Peychev G. I., Zamkovoy V. E., Andreychenko N. V. (2007). JS32-VI superalloy stability after high temperature exposure and operating in D-18T engine. *Gas turbine technologies*, № 8, 40—42.
6. Paton B. E., Gvozdetzky V. S., Dudko D. A., et al. (1979). *Micro-plasma welding*. Kyiv: Scientific thought, 248 p.
7. Petrov G. L., Tumarev A. S. (1967). *Theory of Welding Processes* [with basics of Physical chemistry]. Moscow: Highest School, 508 p.
8. Rykalin N. N. (1951). *Welding heat processes' calculations*. Moscow: Mashgiz, 296 p.
9. Sims Ch., Stoloff N., Hagel V. (1995). *Superalloys II. High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power*. Ed. by R. E. Shalin. Moscow: Metallurgy, 384 p.
10. Sorokyn L. I. (1999). Stress and cracks during welding and thermal processing of nickel superalloys. *Welding. production*, № 12, 11—17.
11. Sorokin L. I. (2004). Welding cracks with oxidized surface on nickel superalloys. *Welding production*, № 12, 30—31.
12. Deloro Stellite technological seminar in Zaporizhzhia (2010). *Autom. welding*, № 1, 59—62.
13. Zinke M., Noibert G., Gerold H. (1999). Properties of nickel-based superalloy weldments. *Autom. welding*, № 4, 35—38.
14. Yushchenko K. A., Savchenko V. S., Yarovytsyn A. V., Nakonechny A. A., Nastenko G. F., Zamkovej V. E., Belozertsev O. S., Andreychenko N. V. (2010). Development of the technology for repair microplasma powder cladding of flange platform faces of aircraft engine high-pressure turbine blades. *Autom. welding*, № 8, 25—29.
15. Yushchenko K. A., Yarovytsyn A. V. (2014). Influence of active gas content and disperse filler continuity on the process of bead formation in microplasma powder surfacing of nickel superalloys. *Autom. welding*, № 6-7, 119—128.
16. 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. *Autom. welding*, № 2, 3—7.
17. Yarovytsyn O. V. (2009). *Micro-plasma powder cladding of nickel superalloys with 45—65 % γ' -phase content*. Ph.D thesis abstract. Kiyv: E. O. Paton Electric Welding Institute, 21 p.
18. Yarovytsyn A. V. (2015). Energy approach in analysis of microplasma powder surfacing modes. *Autom. welding*, № 5-6, 18—25.

19. Yarovytsyn A. V., Novykov S. V. (2009). *Methodological support of submerged calorimetry of low-ampere arcs*. Digest of theses for V Ukrainian scienc.-techn. conference of young scientists and specialists "Welding and related technologies" (E. O. Paton EWI, 27–29 may, 2009). Kyiv: E. O. Paton EWI, 124.
20. Lippold J. C., Kiser S. D., DuPont J. N. (2009). *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. Hoboken, New Jersey, John Wiley&Sons, Inc., 456 p.

Стаття надійшла до редакції 13.01.2022

Received 13.01.2022

Після доопрацювання 18.04.2022

Revised 18.04.2022

Прийнято до друку 19.04.2022

Accepted 19.04.2022

K. A. Yushchenko¹, Member of National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sci. in Tech., Professor

ORCID 0000-0002-6276-7843

O. V. Yarovytsyn¹, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

ORCID 0000-0001-9922-3877

E-mail: yarovytsyn@ukr.net

G. D. Khrushchov¹, Junior Researcher

ORCID 0000-0002-4045-3587

I. A. Petrik², Chief Welder, Ph. D. in Tech.

ORCID-0000-0001-6600-1661

S. L. Chygileichyk², Head of Welding Bureau

ORCID 0000-0002-2372-9078

¹ E. O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine

11, K. Malevicha Str., Kyiv, 03150 Ukraine

² Motor Sich JSC

15, Motorostroiteley Avenue, Zaporozhye, 69068 Ukraine

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF REFURBISHMENT OF HPT BLADES OF THE D-18T AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINE BY MICRO-PLASMA POWDER WELDING

In current work, peculiarities of the micro-plasma powder welding deposition process applied to the batch refurbishment of D-18T aircraft engine HPT blades made of ZhS32-VI nickel superalloy with limited weldability have been studied. It has been demonstrated that extending operating resource over 6–8 thousand hours leads to an increase in ZhS32-VI "base-deposited metal" weld's cracking susceptibility during welding and subsequent thermal processing operations.

It has been shown that providing stable forming of deposited bead on the shroud edge's surface requires applying non-stationary impulse modes of straight polarity welding current. Considering the significant amount of technological parameters of the process studied, subjective analysis of such welding modes is extremely complicated. We have introduced the method of specifying requirements for such single-layer micro-plasma powder welding deposition modes with welding current in a range of 7–20 A according to the criteria of effective arc heating power and heat input, which involves using the system for registration and digital processing of welding current-welding bead deposition time dependency. Based on the analysis of statistical data on the quantitative evaluation of cracking susceptibility of the investigated weld, the optimal range of average values has been discovered for these generalized welding deposition mode parameters to be applied in a manual or automated process, which provides no more than several percent of cracked blades detected at the end of refurbishment technological cycle.

We have shown that significant technological parameters, which affect the amount of technological defects during mentioned blades' refurbishment, are the average value of effective welding current and ZhS32 superalloy powder quality, primarily determined by oxygen and nitrogen average weight content in its dispersed particles. It was also shown that the increase in average weight content of gas impurities in the filler powder, primarily oxygen, causes a significant increase in energy consumed on deposited bead formation during the micro-plasma powder deposition process. An initial quality control method for the ZhS32-VI filler powder range has been proposed. The method is based on the average weight content of oxygen and nitrogen, evaluated by reducing fusion in transporting gas flow and on evaluation criteria of effective arc heating power and heat input average values of witness sample blades' refurbishment process and their conformity to previously defined optimal.

An evaluation of future application possibilities for registration systems and deposition mode analysis in batch repair conditions of nickel superalloy aircraft parts has been introduced.

Keywords: micro-plasma powder welding deposition, HPT turbine batch repair, ZhS32-VI nickel superalloy, cracking susceptibility, filler powder, deposited metal, oxygen and nitrogen content, welding deposition mode registration and analysis system, effective arc heating power, heat input.