

УДК 621.621.45.032.3

doi: 10.32620/aktt.2024.5.04

К. Б. БАЛУШОК, С. Л. ЧИГІЛЕЙЧИК

Публічне акціонерне товариство «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна

РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ІЗ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АДИТИВНИХ ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

З метою підвищення ремонтпридатності деталей авіаційних двигунів у статті було розглянуто застосування адитивних технологій при ремонті. У статті встановлено, що застосування адитивних технологій методом плазмового наплавлення при ремонті деталей авіаційних двигунів, таких як лопатки турбін, дисків ущільнювальних, деталей СА є дуже перспективним і значно підвищує відсоток відновлених після експлуатації деталей та вузлів, які мають значні за площею пошкодження. Лопатки турбін виготовляються із нікелевих жароміцних сплавів з полікристалічною структурою (ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ) або із сплавів із спрямованою кристалізацією (ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ). При напрацюванні більше 6 тис. годин, крім експлуатаційного зносу торців та бокових стінок бандажних полиць, на лопатках, що поступають у ремонт спостерігаються термоутворювальні тріщини глибиною до 6 мм. Технологія аргонового наплавлення та існуючі для даного процесу наплавочні матеріали не забезпечують необхідних для експлуатації лопаток жароміцних властивостей відновленої поверхні. Рішення задачі було здобуто за рахунок застосування джерела стиснутої дуги із прецизійним регулюванням зварювального току і механізацією подачі присадочного матеріалу (порошку), що давало би можливість наплавлення із обмеженою глибиною проплавлення та, відповідно, перемішуванням наплавленого із основним металом. Розроблена технологія дозволила відновити пошкоджені ділянки лопаток після експлуатації (бандажних полиць, лабіринтних гребінців, Z-подібних профілів у торців пера) на жароміцних сплавах із використанням рівномірного основного металу присадочного матеріалу. Для даного процесу використовуються порошки нікелевих та кобальтових сплавів із фракцією +63...-160 мкм, отримані методом атомізації струменем інертного газу (аргону). Основні використовувані порошки – ЖС32-ВИ, ЖС6К-ВИ, ВЗК, Stellite 12, Stellite 6, ХТН61. Матеріал диска – ЕП742-ИД. Робоча середа – повітря, масло або продукти згоряння. Максимальна температура нагріву лабіринтних гребінців до 680°C при максимальному тиску середі до 1,47 МПа. Максимальна окружна швидкість торця гребінця 251 м/с. Матеріал деталей в відповідь ущільнення ЕИ435 (стільники $\delta=0,1$ мм). При розробці технології був урахований вдалий досвід відновлення лабіринтних гребінців лопаток турбін. Відновлення лабіринтних гребінців диска здійснювалося із застосуванням джерела стиснутої дуги із прецизійним регулюванням зварювального струму та роботизованої установки, у склад якої входили робот для переміщення плазмотрона та маніпулятор для обертання диска. Це дало можливість здійснення наплавлення із обмеженою глибиною проплавлення і отримання рівномірного наплавленого валика по всьому діаметру диска. Випробування відновленого диска з метою перевірки його працездатності проводились у складі обкатального авіаційного двигуна. Для цього диск при черговому складанні обкатального двигуна був встановлений в ротор ТСТ. Випробування здійснювалось у 5 циклів тривалістю кожного циклу 15 годин. Зносу лабіринтних гребінців та тріщин виявлено не було. Працездатність відновленого диска підтверджена. Деталі СА виготовлені з жароміцного слабостаріючого високохромистого сплаву на нікелевій основі ЕП648-ВИ. Працюють в умовах гарячого тракту двигуну при температурі до 900 °C. В результаті експлуатації зносу підлягають як торцеві поверхні, так і площинні поверхні в зоні тракту. Для відновлення деталей СА була застосована технологія адитивного виробництва методом мікроплазмового порошкового наплавлення. Для підтвердження працездатності відновлених деталей був проведений комплекс досліджень зразків, що вироблені за технологією, аналогічною до ремонтної. При цьому встановлено, що хімічний склад наплавленого металу відповідає вимогам технічних умов; мікроструктура наплавленого металу після термообробки відповідає нормально термообробленому стану сплаву ЕП 648 ВИ (ХН50ВМТЮБ-ВИ), рівень механічних властивостей вироблених сплавів з наступною серійною термообробкою (старіння 700 °C, витримка 16 годин не нижча за рівень поковки, що застосовується при серійному виготовленні деталі.

Ключові слова: адитивні технології; плазмове наплавлення; механічні властивості; авіаційні двигуни; виробництва.

Вступ

Деталі та вузли у процесі експлуатації авіаційних двигунів отримують значні пошкодження в

результаті впливу зносу, корозії, ерозії, перевантаження, а також потрапляння сторонніх предметів до тракту двигуна. Більшість з них, особливо деталі із жароміцних нікелевих сплавів гарячого тракту є



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

дуже дорогими, та мають тривалий строк виготовлення та заміна їх на нові потребує значних витрат [1]. Використання існуючих методів ремонту, що засновані на зварюванні та наплавленні методом аргондугового зварювання, особливо при напруження більш 3 тис. годин часто обмежені великими площами руйнування, деградацією металу у цій зоні або появою термовтомних тріщин, особливо на сплавах з високим змістом γ' -фази (ЖС 32 ВИ, ЖС 26 ВИ, ЖС6 К, ЖС6У ВИ). Тому актуальним стає розвиток нових технологій ремонту [2, 3].

В останні роки стрімко розвиваються адитивні технології. Суть адитивних технологій це покрокове виготовлення нового виробу за його тривимірною 3D-моделлю [4]. Застосування адитивних технологій при ремонті авіаційних двигунів є дуже перспективним і значно підвищить відсоток відновлених після експлуатації деталей та вузлів, які мають значні за площею пошкодження.

Постановка задачі

Розробка та застосування адитивних технологій при ремонті авіаційного двигуна дозволить значно збільшити розмір відновлених пошкоджених ділянок деталей після експлуатації.

На сьогоднішній день серійне ремонтне виробництво ставить вимоги до збільшення розмірів пошкоджених ділянок в першу чергу для наступних деталей:

- лопатки турбін – торці бандажних полиць, лабіринтних гребінців, Z-подібних профілів та пера лопаток на висоту до 15 мм;
- диски ущільнювальні – повне відновлення лабіринтних гребінців;
- деталі, що входять до соплових апаратів.

Результати

Лопатки турбін

Виготовлені з нікелевих жароміцних сплавів з полікристалічною структурою (ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ) або із сплавів зі спрямованою кристалізацією (ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ).

При напруження більш 6 тис. годин, окрім експлуатаційного зносу торців та бокових стінок бандажних полиць, на лопатках, що надходять у ремонт, спостерігаються термоутворювальні тріщини глибиною до 6 мм. Технологія аргондугового наплавлення та існуючи для даного процесу наплавочні матеріали не забезпечують необхідних для експлуатації лопаток жароміцних властивостей відновленої поверхні. Збільшений знос, а отже і маса наплавленого металу, підвищили схильність до утво-

рення гарячих тріщин при відновленні аргондуговим процесом даних лопаток з нікелевих жароміцних сплавів із змістом γ' -фази більш 55 % [4].

Вирішення задачі було досягнуто за рахунок застосування джерела стиснутої дуги з прецизійним регулюванням зварювального току та механізацією подачі присадочного матеріалу (порошку), що надавало би можливості наплавлення з обмеженою глибиною проплавлення та, відповідно, змішування наплавленого із основним металом. Це також дозволило здійснити відновлення пошкоджених ділянок лопаток після експлуатації (бандажних полиць, лабіринтних гребінців, Z-подібних профілів та торців пера) на жароміцних сплавах з використанням рівномірного основному металу присадочного матеріалу (для лопаток із сплавів ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ – наплавлення сплавом ЖС 32-ВИ, для сплаву ЖС6-К – наплавлення сплавом ЖС6-К) [1, 6].

Був проведений ряд досвідних та дослідницьких робіт, результатом яких стало створення комплексної технології ремонту робочих лопаток ТНТ із нікелевих жароміцних сплавів ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС6У-ВИ та ЖС6К-ВИ із наступною послідовністю технологічних операцій:

1. Механічна зачистка до металевого блиску (видалення нагару, оксидів та теплозахисних покриттів) поверхні від торцю або гребінця, який наплавляється, на глибину 5-10 мм.

2. Вакуумний знегажувач відпал ($T=1250\pm 10^{\circ}\text{C}$, час витримки 20...30 хв., середня – вакуум ($1\times 10^{-3}\dots 1\times 10^{-5}$) mbar).

3. Капілярний контроль ЛЮМ1-ОВ. При виявленні тріщин – повне видалення механічним засобом.

4. Наплавлення пошкоджених (зношених) ділянок лопатки (див. рис. 1) засобом мікроплазмового порошкового наплавлення в 1-7 шарів на установці STARWELD 190H порошком (фракція +63...-163 мкм):

– для лопаток із сплавів ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ – наплавлення порошком ЖС 32-ВИ;

– Z-подібних профілів лопаток із сплаву ЖС6К-ВИ – наплавлення порошком ЖС6К-ВИ;

– лабіринтні гребінці лопаток із сплаву ЖС6К-ВИ – наплавлення порошком ВЗК або Stellite 6;

– лабіринтні гребінці лопаток із сплаву ЖС6У-ВИ – наплавлення порошком ХТН61 или Stellite 12;

5. Вакуумний відпал ($T=960\pm 10^{\circ}\text{C}$, час витримки 180...240 хв., середня – вакуум ($1\times 10^{-3}\dots 1\times 10^{-5}$) mbar).

6. Механічна обробка наплавлених поверхонь до необхідних геометричних розмірів.

7. Капілярний контроль ЛЮМ1-ОВ.

8. Відновлення покриттів.

9. Капілярний контроль ЛЮМ1-ОВ.

Ефективне тепло вкладення у основний метал у

межах 50-650 Вт регулюється енергетичними і тепловими характеристиками мікроплазмової дуги. Для даного процесу використовуються порошки нікелевих і кобальтових сплавів із фракцією +63...-160 мкм, отримані методом атомізації струменем інертного газу (аргону). Основні порошки, що використовуються – ЖС32-ВИ, ЖС6К-ВИ, ВЗК, Stellite 12, Stellite 6, ХТН61 [4, 8].

Диск ущільнювальний

Матеріал диска – ЭП742-ИД. Робоча середина повітря, масло та продукти згоряння. Максимальна температура нагріву лабіринтних гребінців до 680°C при максимальному тиску середина до 1,47 МПа. Максимально окружна швидкість торця гребінця 251 м/с. Матеріал деталі у відповідь ущільнення ЭИ435 (соти $\delta=0,1$ мм).

При розробці технології був урахований вдалий досвід відновлення лабіринтних гребінців лопаток турбін. Відновлення лабіринтних гребінців диску здійснювалося із застосуванням джерела стислої дуги із прецизійним регулюванням установки, у склад якої входить робот для переміщення плазмотрону і маніпулятор для обертання диску. Це дало можливість здійснення наплавлення із обмеженою глибиною проплавлення та отримання рівномірного наплавленого валика по усюму діаметру диска.

Був проведений ряд досвідних і дослідницьких робіт, результатом яких стало створення технології відновлення лабіринтних гребінців диску ущільнювального із наступною послідовністю технологічних операцій:

1. Токарно-гвинторізна. Принизити гребінці (висота після механічної обробки $2\pm 0,2$ мм).

2. Наплавлення лабіринтних гребінців способом мікроплазмового порошкового наплавлення на роботизованій установці STARWELD 190Н порошком NISTELLE C (фракція +63...-163 мкм). Наплавлення виконується у 3 шари. Висота шару $1,5\pm 0,2$ мм.

3. Токарно-гвинторізна. Принизити гребінці (висота після механічної обробки $5,5\pm 0,2$ мм).

4. Наплавлення лабіринтних гребінців способом мікроплазмового порошкового наплавлення на роботизованій установці STARWELD 190Н порошком ВЗК (фракція +63...-163 мкм). Наплавлення виконується у 1 шар. Висота шару $2,0\pm 0,2$ мм.

5. Токарно-гвинторізна. Обробити гребінці до геометричних розмірів серійного креслення.

6. Капілярний контроль гребінців диску. Штрихові свічення не допускаються.

Випробування відновленого диску із метою перевірки його працездатності проводилися у складі обкатального авіаційного двигуна. Для цього диск при черговому складанні об катального двигуна був

встановлений у ротор ТСТ. Виконаний контроль діаметрів по лабіринтним гребінцям у 8 рівнорозташованих точках. Виконане остаточне складання двигуна, його випробування (5 циклів; тривалість кожного циклу 15 годин) і розбирання. Після кожного циклу об катальних випробувань здійснювалися обміри у рівно розташованих точках та контроль лабіринтних гребінців методом ЛЮМ1-ОВ. Зносу лабіринтних гребінців та тріщин виявлено не було. Працездатність відновленого диску підтверджена.

Деталі, що входять до соплових апаратів (СА)

Виготовлені із жароміцних слабо старіючих високохромистих сплавів на нікелевій основі ЭП648-ВИ. Працюють в умовах гарячого тракту двигуна при температурі до 900 °C.

В результаті експлуатації зносу, підлягають як торцеві поверхні, так і площинні поверхні в зоні тракту.

Для відновлення деталей СА була застосована технологія адитивного вирощування методом мікроплазмового порошкового наплавлення. Наплавлення проводилось на спеціалізованій роботизованій установці STARWELD 190Н. У якості присадочного матеріалу, використовувався порошок з жароміцного сплаву на нікелевій основі ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП648ВИ), отриманий плазмовою відцентрованою атомізацією. Розмір частинок 63...160 мкм.

Для підтвердження працездатності відновлених деталей був проведений комплекс досліджень вирощених зразків за технологією, аналогічною ремонтній. При цьому встановлено:

- хімічний склад наплавленого металу відповідає вимогам технічних умов ТУ 14-1-3046-97 «Прутки из жаропрочного сплава марки ХН50ВМТЮБ (ЭП648);

- мікроструктура наплавленого металу після термообробки представляє собою γ -твердий розчин із наявністю карбідів, карбоніт рідів та невеликої кількості γ' -фази (див. рис. 5) та відповідає нормально термообробленому стану сплаву ЭП 648 ВИ (ХН50ВМТЮБ-ВИ).

- рівень механічних властивостей вирощених сплавів із наступною серійною термообробкою (старіння 700 °C, витримка 16 годин) не нижче за рівень поковки, що застосовується при серійному виготовленні деталі і слав (середні значення):

- у поперечному напрямі: $\sigma_B=81,7$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=51,5$ кгс/мм²; $\delta=40,2$ %; $\psi=32,6$ %;

- у поздовжньому напрямі: $\sigma_B=79,9$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=59,2$ кгс/мм²; $\delta=17,5$ %; $\psi=18,5$ % [4].

Приклади застосування

Приклади впроваджених у серійне виробництво лопаток та диска із відновленими методом мікроплазмового напалвлення пошкодженими ділянками наведено на рис. 1-5.



Рис. 1. Лопатки після відновлення бандажної полиці (основний метал – сплав ЖС26-ВИ, матеріал напалвлення – сплав ЖС32ВИ)



Рис. 2. Лопатки після відновлення торця пера (основний та напалвлений метал – сплав ЖС32-ВИ)



Рис. 3. Лопатки після відновлення Z-подібного профілю (основний та напалвлений метал – сплав ЖС6К)



Рис. 4. Лопатки після відновлення лабіринтних гребінців (основний метал – сплав ЖС6К, матеріал напалвлення – сплав Stellite 12)

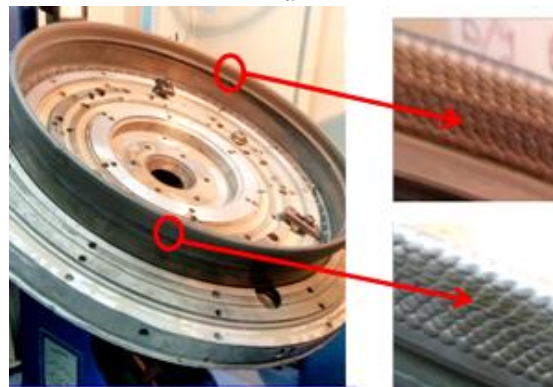


Рис. 5. Диск після відновлення лабіринтних гребінців (основний метал – сплав ЭП742-ИД, матеріал напалвлення – 1-3 шар сплав - NISTELLE C, 4-й шар – ВЗК)

Приклади впроваджених у серійне виробництво деталей, що входять в состав СА методом мікроплазмового напалвлення пошкоджених ділянок наведено на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Деталі СА (а-корпус СА, б-кожух СА) після відновлення

Висновки

1. Встановлено, що застосування адитивних технологій методом ППН при ремонті авіаційного двигуна дозволяє значно підвищити відсоток відновлених після експлуатації деталей та вузлів за рахунок отримання можливості багат шарового відновлення у сплавах з високим змістом γ' -фази (ЖС 32 ВИ, ЖС 26 ВИ, ЖС6 К, ЖС6У ВИ) та значно збільшити за площею відновлення пошкоджених ділянок з інших нікелевих сплавів (ЭП742, ЭП648ВИ).

2. Підтверджена працездатність відновлених деталей.

3. Розроблені технології ремонту робочих лопаток ТВТ, дисків ущільнювальних, деталей СА.

Внесок авторів: формулювання проблеми – С. Л. Чигілейчик; огляд та аналіз інформаційних джерел – С. Л. Чигілейчик; постановка задачі – К. Б. Балуюк; побудова моделі та проведення моделювання – К. Б. Балуюк; оцінка результатів – С. Л. Чигілейчик; формулювання висновків – К. Б. Балуюк.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку керівництву АТ «Мотор Січ»

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Experimental Investigation on Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly*

Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method [Text] / M. Moradi, H. Falavandi, M. K. Moghadam, & M. S. M. Meiabadi // *Modares Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 20, iss. 4. – P. 999-1009. – Available at: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-31700-en.html>. – 12.08.2024.

2. *Досвід впровадження адитивних технологій при ремонті деталей ГТД зі сплавів ЕП 648 ВІ (ХН50ВМТЮБ-ВІ) в умовах серійного виробництва [Текст]* / С. Л. Чигілейчик, І. А. Петрик, О. В. Овчинников, С. В. Курилах // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 1. – С. 57-63. DOI: 10.32620/aktt.2022.1.07.

3. *Understanding the impact of oxygen and nitrogen content in metal powder on microplasma multilayers deposition of aircraft GTE blade edges [Text]* / K. A. Yuschenko, O. V. Yarovytsyn, H. D. Khrushchov I. A. Petryk, & S. L. Chyhileychik // *Proceedings of 9th International conference of young scientist on welding and related technologies, PWI NAS of Ukraine, 23-26 May 2017*. – P. 257-261.

4. *Жеманюк, П. Д. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства [Текст]* / П. Д. Жеманюк, И. А. Петрик, & С. Л. Чигілейчик // *Автоматическая сварка*. – 2015. – №8. – С. 43-46. – Режим доступу: <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2015/08/08>. – 12.08.2024.

5. *Особенности управления формой валика при однослойной микроплазменной порошковой наплавке на кромки лопаток авиационных ГТД [Текст]* / П. Д. Жеманюк, И. А. Петрик, С. Л. Чигілейчик, и др. // *Автоматическая сварка*. – 2016. – № 11. – С. 26-34. DOI: 10.15407/as2016.11.04.

6. *Yarovytsyn, O. V. Estimation to optimize energy spent on a single welding pool creation in micro-plasma powder deposition process of JS32 nickel superalloy HPT blade's bandage shelve [Text]* / O. V. Yarovytsyn, H. D. Khuschchov, & S. L. Chyhileychik // *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. – 2019. – Vol. 7, iss. 1. – 5 p. – Available at: <https://iraj.doionline.org/dx/IJMPE-IRAJ-DOIONLINE-14928> – 12.08.2024.

7. *Формування критеріїв оцінки придатності застосування присадних матеріалів з нікелевих сплавів у адитивних технологіях 3D-наполення [Текст]* / О. В. Яровицін, М. О. Черв'яков, & др. // *Металофізика та новітні технології*. – 2024. – Т. 46, вип. 2. – С. 129-149. DOI: 10.15407/mfint.46.02.0129.

8. *Дослідження і оптимізація процесу серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням [Текст]* / К. А. Ющенко, О. В. Ярови-

цин, Г. Д. Хрущов, И. А. Петрик, & С. Л. Чигилейчик // *Космічна наука і технологія*. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 3-16. DOI: 10.15407/knit2022.03.003.

References

1. Moradi, M., Falavandi, H., Moghadam, K. M., & Meiabadi, M. S. M. Experimental Investigation on Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method. *Modares Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 999-1009. Available at: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-31700-en.html> (accessed 12 Aug. 2024).

2. Chihyleychyk, S. L., Petryk, I. A., Ovchynnykov, O. V., & Kyrylakha, S. V. Dosvid vprovadzhennya adyativnykh tekhnolohiy pry remonti detaley HTD zi splaviv EP 648 VI (KHN50VMYUB-VI) v umovakh seriynoho vyrobnytstva [Experience in implementing additive technologies during repair of GTE parts from alloy EP 648 VI (KHN50VMYUB-VI) under conditions of serial production]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 1, pp. 57-63. DOI: 10.32620/akt.2022.1.07. (In Ukrainian).

3. Yuschenko, K. A., Yarovytsyn, O. V., Khrushchov, H. D., Petryk, I. A., & Chyhileychik, S. L. Understanding the impact of oxygen and nitrogen content in metal powder on microplasma multilayers deposition of aircraft GTE blade edges. *Proceedings of 9th International conference of young scientist on welding and related technologies, PWI NAS of Ukraine*, 23-26 May 2017, pp. 257-261.

4. Zhemanjuk, P. D., Petrik, I. A., & Chigileychik, S. L. Opyt vnedreniya vosstanovitel'noy mikroplazmennoy poroshkovoy naplavki pri remonte lopatok turbin vysokogo davleniya v usloviyakh seriynogo proizvodstva. *Avtomat. Svarka – Automatic Welding*, 2015, no. 8, pp. 43-46. Available at: <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2015/08/08> (accessed 12 Aug. 2024). (In Russian).

5. Zhemanjuk, P. D., Petrik, I. A., Chigileychik, S. L., & et al. Osobennosti upravleniya formoj valika pri odnoslojnoj mikroplazmennoj poroshkovoj naplavke na kromki lopatok aviacionnyh GTD [Peculiarities of bead shape regulation in single-layer microplasma surfacing on edges of aircraft gas turbine engine blades]. *Avtomat. Svarka – Automatic Welding*, 2016, no. 11, pp. 26-34. DOI: 10.15407/as2016.11.04. (In Russian).

6. Yarovytsyn, O. V., Khuschchov, H. D., & Chyhileychik, S. L. Estimation to optimize energy spent on a single welding pool creation in micro-plasma powder deposition process of JS32 nickel superalloy HPT blade's bandage shelve. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2019, vol. 7, iss. 1. 5 p. Available at: <https://iraj.doionline.org/dx/IJMPE-IRAJ-DOIONLINE-14928> (accessed 12 Aug. 2024).

7. Yarovytsyn, O. V., Cherv'yakov, M. O., & et al. Formuvannya kryteriyiv otsinky prydatnosti zastosuvannya prysadnykh materialiv z nikelovykh stopiv u adyativnykh tekhnolohiyakh ZD-natoplennya [Formation of Criteria for Evaluating the Suitability of the Use of Filler Materials Made of Nickel Alloys in Additive Technologies of 3D-Surfacing]. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2024, vol. 46, no. 2, pp. 129-149. DOI: 10.15407/mfint.46.02.0129. (In Ukrainian).

8. Yushchenko, K. A., Yarovytsyn, O. V., Khrushchov, G. D., Petrik, I. A., & Chygileychik, S. L. Doslidzhennya i optymizatsiya protsesu seriynoho remontu robochykh lopatok aviatsiynoho hazoturbynnoho dvyhuna D-18T mikroplazmovym poroshkovym naplavlennym [Research and optimization of refurbishment of HPT blades of the D-18T aircraft gas turbine engine by micro-plasma powder welding]. *Space Science and Technology*, 2022, vol. 28, iss. 3, pp. 3-16. DOI: 10.15407/knit2022.03.003. (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 16.08.2024, розглянута на редколегії 15.10.2024

REPAIR OF AIRCRAFT ENGINE PARTS MADE OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS USING ADDITIVE PLASMA TECHNOLOGIES

Konstantin Balushok, Sergey Chigileychik

In order to improve the maintainability of aircraft engine parts, the article examined the use of additive technologies in repairs. The article establishes that the use of additive technologies by the method of plasma surfacing in the repair of aircraft engine parts, such as turbine blades, sealing discs, NA parts, is very promising and will significantly increase the percentage of parts and assemblies restored after operation, which have a significant area of damage. Turbine blades are made of nickel heat-resistant alloys with a polycrystalline structure (ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ), or from alloys with directional crystallization (ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ). After operating for more than 6 thousand hours, in addition to the operational wear of

the ends and side walls of the shroud flanges, thermal fatigue cracks up to 6 mm deep are observed on the blades received for repair. The technology of argon-arc surfacing and the surfacing materials existing for this process do not provide the heat-resistant properties of the restored surface necessary for the operation of the blades. The solution to the problem was achieved through the use of a compressed arc source with precision adjustment of the welding current and mechanization of the supply of filler material (powder), which would make it possible to surfacing with a limited penetration depth and, accordingly, mixing the deposited material with the base metal. The developed technology made it possible to restore damaged sections of blades after operation (shroud flanges, labyrinth scallops, z-shaped profiles and airfoil ends) on heat-resistant alloys using filler material equal to the strength of the base metal. For this process, powders of nickel and cobalt alloys with a fraction of +63...-160 microns are used, obtained by atomization with a jet of inert gas (argon). The main powders used are ЖС32-ВИ, ЖС6К-ВИ, В3К, Stellite 12, Stellite 6, XTH61. Disc material – ЭП742-ИД. Working medium, air, oil and combustion products. The maximum heating temperature of labyrinth scallops is up to 680 °C at a maximum medium pressure of up to 1.47 MPa. The maximum peripheral speed of the scallop end is 251 m/s. Material of seal mating parts ЭИ435 (cell $\delta = 0,1$ mm). When developing the technology, the successful experience of restoring labyrinthine scallops of turbine blades was taken into account. The restoration of the labyrinthine ridges of the disk was carried out using a compressed arc source with precision control of the welding current and a robotic installation, which included a robot for moving the plasma torch and a manipulator for rotating the disk. This made it possible to carry out surfacing with a limited penetration depth and obtain a uniformly directed bead over the entire diameter of the disk. Testing of the restored disk in order to verify its performance was carried out as part of a run-in aircraft engine. To do this, after the next assembly of the run-in engine, the disk was installed in the MPT rotor. The test was carried out in 5 cycles, the duration of each cycle was 15 hours. No wear of the labyrinth ridges or cracks was detected. The functionality of the restored disk has been confirmed. NA parts are made of heat-resistant, low-aging, high-chromium nickel-based alloy ЭП648-ВИ. They operate in hot engine conditions at temperatures up to 900°C. As a result of operation, both end surfaces and flat surfaces in the tract area are subject to wear. To restore parts of the NA, the technology of additive growth by the method of microplasma powder surfacing was used. To confirm the operability of restored parts, a set of studies of samples grown using the same repair technology was conducted. At the same time, it was established that the chemical composition of the deposited metal corresponds to the requirements of the technical conditions-» the microstructure of the deposited metal after heat treatment corresponds to the normal heat-treated state of the alloy ЭП648-ВИ (XH50BMTЮБ-ВИ), the level of mechanical properties of the grown alloy with subsequent serial heat treatment (aging at 700°C, exposure -16 hours) is not lower than the forging level used in serial production of the part.

Keywords: additive technologies; plasma deposition; mechanical properties; aircraft engines; cultivation.

Балушок Константин Броніславович – канд. техн. наук, головний інженер АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Чигілейчик Сергій Леонідович – провідний інженер АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Konstantin Balushok – Candidate of Science, Chief Engineer at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: motor@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-8212-9275.

Sergey Chigileychik – Lead Engineer of Motor Sich JSC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-2372-9078.