Розробка технології відновлення турбінних лопаток з титанового сплаву Ti-6Al-4V

Артьовома С.В.1, кандидат технічних наук, начальник ЦЗЛ;

Бевз Т.І.1, начальник лабораторії МіТО;

Бережна О.В.2, доктор технічних наук, доцент;

Малигіна С.В.2, кандидат технічних наук, доцент;

Бережний М.О.2, аспірант;

1 АТ “Українські енергетичні машини”, пр. Героїв Харкова, 199, Харків, 61037,
Україна

2 Донбаська державна машинобудівна академія, вул. Федьковича, 9, Тернопіль, 46000,
Україна
elena.kassova07@gmail.com

**Ключові слова:** зварювання TIG; турбінні лопатки; титановий сплав; зношені поверхні.

1. Вступ

Однією з найважливіших проблем експлуатації турбінного обладнання є ушкодження робочих лопаток ступенів низького тиску в результаті ерозійного зносу [1, 2]. Дослідження [3-5] свідчать, що найнебезпечнішими є утворення кратерів та щілиноподібних ушкоджень, що утворюються на робочих лопатках п'ятої ступені турбіни. У зв'язку з цим економічно виправданим є відновлювальне наплавлення титанових робочих лопаток ступенів низького тиску турбін атомних електростанцій, беручі до уваги високу вартість основного металу деталей.

1. Методика проведення досліджень

Дослідження технологічної зварюваності при дуговому відновлювальному наплавленні на зразках з титанового сплаву Ti-6Al-4V проводили з використанням наступних вихідних матеріалів: основний метал зразків – титановий сплав Ti-6Al-4V з відходів виготовлення штатних лопаток; присадковий матеріал трьох типів (титановий пруток марки BÖHLER ERTi2-IG Ø2.0мм; зварювальний дріт марки ВТ-1-00 Ø2.0 мм; титановий пруток 2×1.5 марки Ti-6Al-4V з відходів при виготовленні штатних лопаток); захисний газ-аргон газоподібний вищого гатунку (ДСТУ EN ISO 14175:2014); вольфрамові електроди, що не плавляться, марки WITSTAR WS-2 Ø2.4 (ДСТУ EN ISO 6848:2015).

Технологія відновлення зношених ділянок бандажів лопаток включала попередню підготовку, дугове наплавлення з припуском та подальшу механічну обробку відновленої ділянки. В рамках роботи проведено дослідження механічних характеристик (замір твердості, визначення ударної в’язкості), а також аналіз макроструктури наплавлених зразків та дослідження їх мікроструктури. Для контролю макроструктури було виготовлено три поперечних темплети, на кожному з яких наплавлені по 3 ділянки з одним типом присадкового матеріалу. Контроль макроструктури темплетів проводили методом холодного травління. Випробування на твердість наплавленого шару проводили за методом Брінелля (ДСТУ EN ISO 6506-1:2019). В якості індентора використовували шарики діаметром 5 мм з навантаженням 750 кг.

Визначення мікротвердості різних ділянок наплавлених зразків здійснювали за методом Віккерса з використанням навантаження 100 г, вдавленням алмазного індентору з кутом при вершині 136° (ДСТУ ISO 6507-1:2007). Випробування на ударний вигин здійснювали за методикою Шарпі (ДСТУ ISO 148-1:2022) на зразках з U-подібним надрізом. Випробування проводили як для наплавленого металу, так і для основного металу зразків. При цьому у першому випадку надріз виконували у наплавленому металі, у другому випадку – в основному металі.

1. Аналіз одержаних результатів

Результати проведених досліджень на ударний вигин свідчать про більш високі показники ударної в’язкості в зоні наплавленого металу порівняно з основним металом для зразків, наплавлених зварювальним дротом марки ВТ-1-00, та для зразків, наплавлених титановим прутком марки Ti-6Al-4V, а саме 47 Дж/см2 та 46 Дж/см2, відповідно. Причому ударна в’язкість основного металу цих зразків складає, відповідно, 44 Дж/см2 та 37 Дж/см2. Найнижчий показник ударної в’язкості одержано в наплавленому шарі, нанесеному титановим прутком марки BÖHLER ERTi2-IG – близько 42 Дж/см2, що нижче ударної в’язкості основного металу зразка – 48 Дж/см2. Проте результати вимірювання твердості наплавленого шару, свідчать про те, що всі три типи досліджуваних матеріалів при обраній технології відновлення забезпечують однаковий рівень механічних характеристик за показником твердості, а саме 341 НВ.

Крім того проведені дослідження макро- та мікроструктури наплавлених зразків свідчать про те, що дугове наплавлення титановим прутком BÖHLER ERTi2-IG Ø2.0 мм дозволяє одержати більш рівномірну структуру по перетину зразку. В результаті замірювання мікротвердості для зразків, наплавлених таким типом присадкового матеріалу, одержані значення одного порядку для всіх зон зварного з’єднання, що свідчить про відсутність напружень, які утворюються при формуванні структури в процесі наплавлення.

Результати проведених досліджень технології відновлення зношеної поверхні бандажів робочих лопаток з титанового сплаву Ti-6Al-4V для турбінного обладнання атомної електростанції показали достатньо хорошу зварюваність всіх використовуваних присадкових матеріалів. Всі три типи присадкових матеріалів, а саме титановий пруток марки BÖHLER ERTi2-IG Ø2.0мм, тип ERTi2 за AWS А5.6 (EN ISO 24034:2020); зварювальний дріт марки ВТ-1-00 Ø 2.0 мм; титановий пруток 2×1.5 марки Ti-6Al-4V, забезпечують необхідні показники механічних характеристик та відсутність зони підкалювання на межі сплавлення основного та наплавленого металу. Таке плавне перетворення структури по перетину наплавлених зразків дозволяє виключити з технологічного процесу операцію післязварювальної термічної обробки та одержати необхідний комплекс механічних властивостей. Проте найбільш рівномірною макро- та мікроструктура по перетину наплавленого зразку з показниками мікротвердості одного порядку для всіх ділянок спостерігається при використанні в якості присадкового матеріалу титанового прутка марки BÖHLER ERTi2-IG. Незважаючи на більш низькі показники ударної в’язкості в наплавленому шарі порівняно з наплавленням двома іншими присадковими матеріалами, результати мікроструктурних досліджень наплавленого зразку дозволяють рекомендувати при відновленні поверхонь деталей з титанового сплаву Ti-6Al-4V в якості присадкового матеріалу для дугового наплавлення неплавким електродом в середовищі аргону титановий пруток марки BÖHLER ERTi2-IG Ø2.0мм, тип ERTi2 за AWS А5.16-04.

Список посилань

1. Ahmad M. Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials / M. Ahmad, M. Casey, N. Sürken // Wear. – 267 (9-10). – 2009. – PP. 1605-1618. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.06.012>
2. Hamed A. A. Turbine Blade Surface Deterioration by Erosion / A. A. Hamed, W. Tabakoff, R. B. Rivir, K. Das, P. Arora // Journal of Turbomachinery. – 127(3). – 2005. – PP. 445–452. <https://doi.org/10.1115/1.1860376>
3. Vorobiov Yu.S. Vibration Features of Titanium Alloy Blades with Erosive Damages / Yu.S. Vorobiov, N.Yu. Ovcharova, A.S. Olkhovskyi, O.V. Makhnenko, V.M. Torop, O.Ye. Hopkalo // Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia. – 21(4). – 2018. – PP.13-21. <https://doi.org/10.15407/pmach2018.04.013>
4. Torop V.M. Results of studying the causes for cracking in titanium alloy blades of steam turbines of K-1000-60/3000 TYPE / V.M. Torop, O.V. Makhnenko, G.Yu. Saprykina, E.E. Gopkalo // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – 2. – 2018. – PP. 3-15. <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.02.01>
5. Vorobiov Yu. Vibration of Titanium Blades of Turbomachines for Nuclear Power Plants with Erosive Damage / Yu. Vorobiov, O. Makhnenko, N. Ovcharova, A. Olkhovskyi // Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. – 8. – 2019. – PP. 334-340. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2_61>