

ВІДНОВЛЮВАЛЬНИЙ РЕМОНТ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВОЇ ТУРБІНИ ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

О.В. Махненко, Г.Ю. Саприкіна, О.М. Савицька, М.С. Ананченко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: oleh.makhnenko@gmail.com

Ремонт відповідальних елементів конструкції, до яких можна віднести робочі лопатки потужних парових турбін із титанового сплаву, доцільно виконувати за допомогою адитивної технології, що зумовлено високими вимогами до якості виробу, а саме необхідністю забезпечити потрібну мікроструктуру та механічні властивості матеріалу лопатки, а також низький рівень залишкового напружено-деформованого стану і окислення поверхні матеріалу. Застосування методів математичного моделювання на базі комп'ютерних технологій дозволяє зменшити обсяг експериментальних досліджень і забезпечити необхідну якість ремонту, що гарантує певну надійність та роботоздатність лопаток після ремонту. Бібліогр. 7, рис. 7.

Ключові слова: парова турбіна, робоча лопатка, титановий сплав, відновлювальний ремонт, адитивна технологія, електронно-променеве наплавлення, розрахункове прогнозування

Вступ. На АЕС України експлуатуються п'ять потужних парових турбін типу К-1000-60/3000, робочі лопатки останніх ступенів циліндрів низького тиску (ЦНТ) яких працюють в умовах вологого парового середовища і набувають ерозійних пошкоджень (рис. 1). Цей фактор знижує залишковий ресурс робочих лопаток з титанового сплаву, призводить до можливих зупинок та аварій турбоагрегатів. Завдяки проведеному комплексу досліджень [1, 2] визначено механічні властивості, їх можливу деградацію та границю втоми матеріалу лопаток в умовах довготривалої експлуатації. Продовження ресурсу робочих лопаток п'ятого ступеня ЦНТ турбін К-1000-60/3000 в умовах вологої парової ерозії на даний час є актуальною проблемою.

Аналіз існуючих засобів продовження ресурсу лопаток з титанових сплавів в умовах вологої ерозії та вібраційних напружень [1] показав, що ресурс безпечної експлуатації робочих лопаток останнього ступеня ЦНТ турбіни може бути продовжений за критеріями відбракування та при умовах, які зазначені нижче:

- за розміром хорди: у відповідності до [3] після видалення ерозійного зношення вихідних кромek робочих лопаток із титанового сплаву ТС5 необхідно виконати контроль методом травлення; граничний розмір хорди профілю в еродованих перерізах, при досягненні якого необхідна заміна лопаток (з допустимою відстрочкою не більше 1 року у випадку відсутності лопатки на заміну) – 130 мм;

- за станом бандажних полок: у випадку виникнення зношення (зазорів) в контактних поверхнях більше 1 мм, а також відколів і викришування необхідний ремонт;

- за строком напрацювання: для лопаток з титанового сплаву ТС5 допустимий строк експлуатації – 100 тис. год.

Треба відзначити, що критерій відбракування робочих лопаток за строком напрацювання є занадто консервативним. Досвід свідчить, що лопатки, які відпрацювали більше ніж 180 тис. год. (ВП ХАЕС) були в експлуатації майже вдвічі



Рис. 1. Ерозійний знос робочої лопатки останнього ступеня ЦНТ парової турбіни К-1000-60/3000: а – загальний вид 5-го ступеня; б – дефект ерозійного зносу кромки лопатки

Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Саприкіна Г.Ю. – <https://orcid.org/0000-0003-1534-7253>, Савицька О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-9363-6184>, Ананченко С.М. – <https://orcid.org/0000-0003-2723-6673>

© О.В. Махненко, Г.Ю. Саприкіна, О.М. Савицька, М.С. Ананченко, 2023

довше, ніж допустимий виробником експлуатаційний строк.

Також заводом-виробником турбін типу К-1000-60/3000 був переданий експлуатуючим організаціям технологічний процес виправлення дефектів на робочих лопатках 5-го ступеня ЦНТ шляхом дугового приварювання вставок з наступною зачисткою і контролем місць зварювання. Рекомендовані режими неплавким електродом в захисному газі (аргоні) без присадкового матеріалу: вольфрамовий електрод $d = 2$ мм, струм 50...80 А, полярність пряма, витрати аргону 8...10 л/хв.

Отже, узагальнюючи вищесказане, ресурс експлуатації робочих лопаток можна продовжити, якщо:

- граничний розмір хорди лопатки в ерודה-вих перерізах не менше 130 мм;
- зношення (зазор) в контактних поверхнях бандажних полок менше 1 мм, відсутні відколи та викирчування;
- вже проведено ремонт із видаленням ерозії на кромках лопатки та зношення в контактних поверхнях бандажних полиць за допомогою механічної обробки у випадку, коли розмір хорди після ремонту не менше граничного або із застосуванням вставок, виконаних за допомогою технології аргонодугового зварювання неплавким електродом.

Але обґрунтування забезпечення при ремонті аргонодуговим зварюванням низького рівня загальних деформацій лопатки і достатнього рівня опору втомі матеріалу лопатки в зоні плавлення та термічного впливу заводом-виробником робочих лопаток парових турбін не було надано.

Перспективним є ремонт робочих лопаток з титанового сплаву турбін К-1000-60/3000 з використанням сучасних технологій пошарового формування електронно-променевим наплавленням в вакуумних камерах, яке може забезпечити низький рівень залишкових деформацій форми та окислення поверхні матеріалу, а також необхідну мікроструктуру та механічні властивості матеріалу лопатки.

Мета роботи – показати можливість відновлювального ремонту робочих лопаток парових турбін з титанового сплаву із використанням адитивної технології електронно-променевого наплавлення у вакуумних камерах, що здатне забезпечити необхідні механічні властивості та геометричну точність виробу у порівнянні із застосуванням аргонодугового зварювання.

Технологія відновлювального ремонту. Технологія відновлювального наплавлення робочих лопаток п'ятого ступеня ЦНТ парової турбіни К-1000-60/3000 з ерозійними пошкодженнями має включати наступні етапи:

1. Механічна обробка зони ерозійного зносу з видаленням пошкодженого металу.

2. Багатошарове електронно-променеве наплавлення зони зносу до початкових розмірів.

3. Термічна обробка (загальна) лопатки з метою формування необхідної структури металу та зниження рівня залишкових напружень.

4. Механічна обробка до заданих у конструкторській документації розмірів і шорсткості верхньої робочої лопатки.

5. Нанесення захисного покриття (додаткова опція) [4].

Найскладнішим є етап 2 запропонованої технології, а саме багатошарове електронно-променеве наплавлення зони зносу до початкових розмірів у вакуумних камерах, оскільки необхідно забезпечити низький рівень залишкових деформацій форми та напружень лопатки, а також необхідну мікроструктуру та механічні властивості матеріалу лопатки. Для аналізу цього питання було проведено скінченно-елементне моделювання цієї технологічної операції на моделі таврового зразка обмеженого розміру та повнорозмірної моделі робочої лопатки.

Дослідження особливостей впливу технологічних параметрів пошарового наплавлення на залишковий стан таврового зразка. Розглядалось пошарове електронно-променеве наплавлення зразка з титанового сплаву Вt6 тонкими валіками завширшки 3 мм і завтовшки приблизно 0,5 мм. Швидкість наплавлення 14 мм/с. Результати розв'язання задачі нестационарної теплопровідності показали, що кінетика температурного поля при пошаровому формуванні таврового зразка на підкладці розміром $8 \times 30 \times 70$ мм, яка імітує тіло лопатки з точки зору теплопровідності та жорсткості конструкції, має істотно тривимірний характер (рис. 2) [5].

Як показали результати розрахунку, даний процес характеризується досить високими швидкостями охолодження ($160...660$ °C/с). Згідно з діаграмою мікроструктурних перетворень сплаву Вt6 у наплавленому матеріалі таврового зразка утворюється мартенситна мікроструктура з вмістом α -фази [6]. За даними розрахунків у матеріалі першого шару, де отримано найвищу швидкість охолодження через наявність масивної холодної підкладки, утворюється зерно розміром 180 мкм, а в точках при формуванні 5 і 20 шарів, де матеріал наплавляється на вже розігрітий зразок, розмір зерна значно більший – $300...450$ мкм.

Технологічний параметр часу затримки Δt між наплавленням валіків (рис. 4, а–в) суттєво впливає на швидкість охолодження та розмір зерна, і, як наслідок, на границю текучості матеріалу деталі [6]. Видно, що кращі механічні характеристики та рівномірніша структура матеріалу визначені в зразку, виготовленому з більшим часом Δt , тоді як

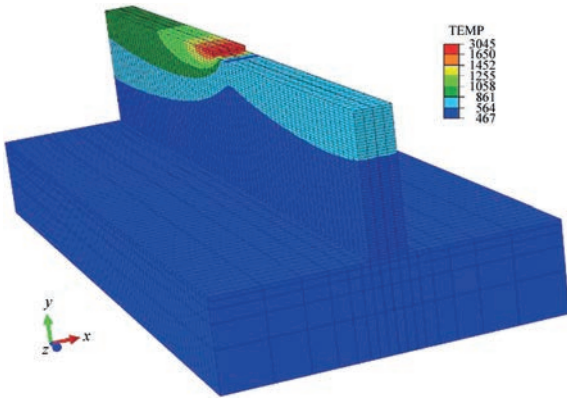


Рис. 2. Результати розрахунку в тавровому зразку розподілу температури в процесі пошарового формування деталі [5]

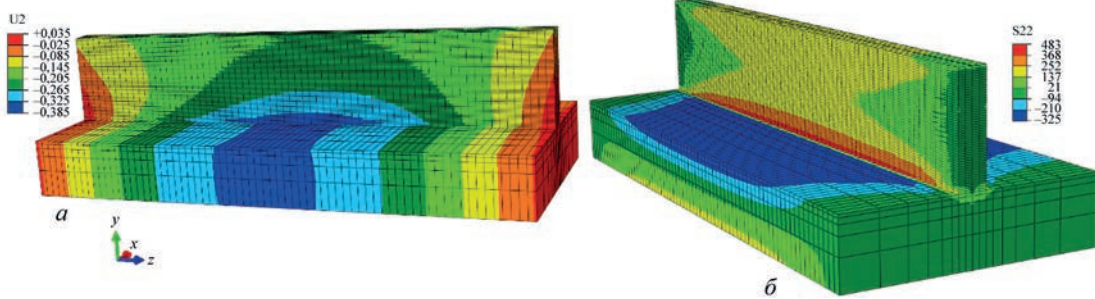


Рис. 3. Результати розрахунку в тавровому зразку залишкового напружено-деформованого стану [5]: а – повздовжній прогин; б – повздовжні напруження

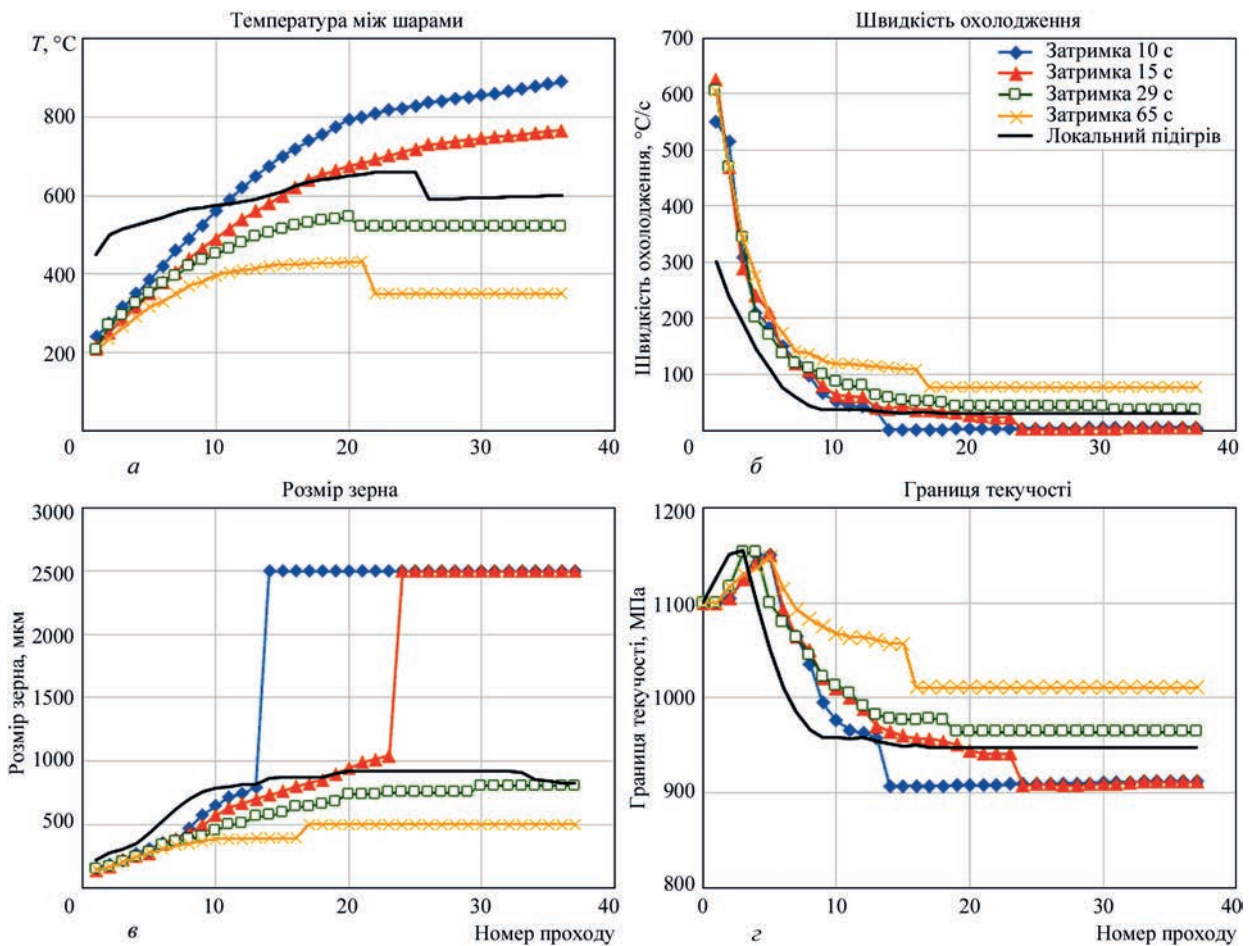


Рис. 4. Залежність температури у точці перед наплавленням наступного шару (а), швидкості охолодження (б), розміру зерна (в) і границі текучості матеріалу (г) від номера проходу для різного часу затримки між проходами [6]

дель робочої лопатки 5-го ступеня ЦНТ турбіни К-1000-60/3000, де в характерній зоні ерозійних пошкоджень, а саме в верхній частині лопатки завдовжки 100 мм моделюється відновлювальне наплавлення матеріалу (титанового сплаву TC5 або Вt6). Режим наплавлення аналогічний режимам на таврових зразках. Висота зони наплавлення приймається рівною 10 мм, що відповідає максимальному рівню глибини ерозійного пошкодження робочої лопатки. Передбачається, що перед наплавленням проводиться механічне оброблення зони ерозійних пошкоджень з видаленням матеріалу лопатки на глибину 10 мм. Метою математичного моделювання є прогнозування залишкового рівня напруженого стану та загальних деформацій формозміни робочої лопатки, а також структурного стану матеріалу в зоні наплавлення, згідно з якими вибір оптимальних технологічних параметрів відновлювального наплавлення може проводитись. Враховуючи габаритні розміри робочої лопатки – довжина 1200 мм – можливо проведення після наплавлення загальної (пічної) термічної обробки з метою зниження рівня залишкових напружень і отримання рівномірнішої структури матеріалу.

На рис. 5 показано розрахунковий розподіл температури під час електронно-променевого наплавлення лопатки. У режимі наплавлення з паузами 29 с між шарами матеріал зони ремонтного відновлення лопатки розігрівається до температури 250...500 °С.

Загальні деформації формозміни робочої лопатки залишаються критичним параметром для технології відновлювального наплавлення. Аналіз отриманих результатів чисельного експерименту (рис. 6, 7) з відновлювального наплавлення лопатки в зоні ерозійних пошкоджень показав:

1. У зоні наплавлення (локально) утворюються досить високі залишкові напруження (поздовжня компонента), на рівні межі текучості титанового сплаву (до ≈ 800 МПа).

2. Після наплавлення прогноуються загальні залишкові деформації лопатки (крутильні), максимальна величина яких не перевищує 0,9 мм.

3. Моделювання загальної термообробки в печі може показати істотне зниження залишкових на-

пружень (позитивний ефект) і збільшення загальних деформацій лопатки (негативний ефект).

Важливим питанням розробки технології відновлювального наплавлення відповідальних конструкційних елементів є забезпечення низького рівня пошкодженості матеріалу наплавлення під час виробництва та визначення вимог за допустимими розмірами дефектів. Стосовно виробництва за допомогою технології пошарового формування електронно-променевим наплавленням балкових конструкцій Т-подібного профілю шляхом чисельних досліджень крихкої міцності було показано [7], що необхідна роздільна здатність неруйнівного контролю, становить близько 0,5 мм, що забезпечує запас міцності не менше $n = 2$ при дотриманні необхідних умов температурного режиму

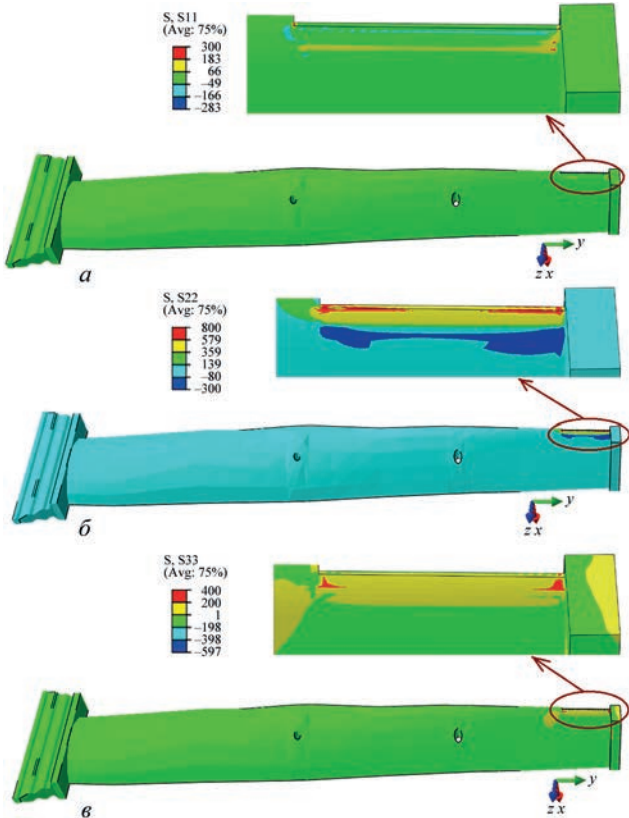


Рис. 6. Розподіл залишкових напружень: а – компоненти σ_{xx} за висотою наплавлення ($\sigma_{xx} = -150...300$ МПа); б – поздовжньої компоненти σ_{yy} ($\sigma_{yy} = -300...800$ МПа); в – поперечної компоненти σ_{zz} за товщиною лопатки ($\sigma_{zz} = -200...400$ МПа)

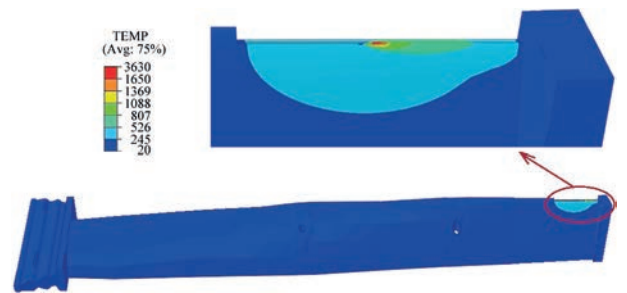


Рис. 5. Розподіл температури під час електронно-променевого наплавлення

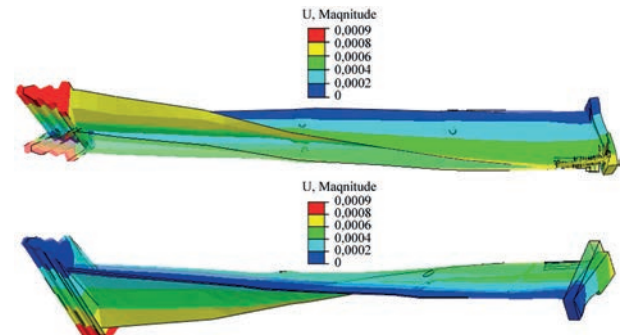


Рис. 7. Залишкові деформації лопатки (крутильні), величина максимальних переміщень до 0,9 мм

формування виробу з точки зору забезпечення необхідної структури та механічних властивостей матеріалу лопатки.

Висновки

1. Запропоновано підхід до ремонту робочих лопаток з титанового сплаву потужної парової турбіни К-1000-60/3000 з використанням адитивної технології пошарового формування з метою відновлення початкової геометрії електронно-променевим наплавленням у вакуумних камерах.

2. Результати скінченно-елементного моделювання показали принципову можливість забезпечення низького рівня залишкових деформацій форми, а також необхідної мікроструктури та механічних властивостей матеріалу лопатки після відновлювального ремонту з використанням адитивної технології пошарового формування. Але для зниження рівня залишкових напружень і забезпечення високої рівномірності структури та механічних властивостей матеріалу в зоні ремонту доцільним є проведення загальної термообробки.

Список літератури

1. Тороп В.М., Махненко О.В., Сапрыкина Г.Ю., Гопкало Е.Е. (2018) Результаты исследований причин образования трещин в лопатках из титанового сплава паровых турбин типа К-1000-60/3000. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.02.01>
2. Kanel, G.I., Razorenov, S.V., Fortov, V.E. (2004) *Shok-Wave phenomena and the properties of condensed matter*. New-York, Berlin, Heidelberg, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4282-4>
3. (2004) СО 153-34.17.462-2003 *Контроль методом травления выходных кромок рабочих лопаток из сплава ТС5 после удаления эрозионного износа. Инструкция*. Москва, Мин. энергетики РФ, ЦПТИ ОРГРЭС.
4. Білоус В.А., Воеводін В.М., Хороших В.М. та ін. (2016) Створення експериментального обладнання і основних технологічних прийомів отримання кавітаційно-стійких захисних покриттів на робочих поверхнях лопаток парових турбін з титанового сплаву ВТ6 з метою заміщення імпорту аналогічної продукції. *Наука та інновації*, 12(4), 27–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin12.04.027>
5. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of

small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding J.*, 3, 7–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.02>

6. Махненко О.В., Ананченко Н.С., Кандада С.М. та ін. (2018) Прогнозування структури і механічних властивостей титанового сплаву ВТ6 при пошаровому формуванні 3D виробів за допомогою адитивної технології електронно-променевого наплавлення. *Mechanics and Advanced Technologies*, 3(84), 5–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.84.144127>
7. Махненко О.В., Миленин А.С., Великоиваненко Е.А. и др. (2018) Прогнозирование особенностей кинетики термомодифицированного состояния компактных образцов различной геометрии при их послойном формировании на оборудовании xBeam 3D Metal Printer. *Сб. тр. IX междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*, сс. 68–76.

References

1. Torop, V.M., Makhnenko, O.V., Saprykina, G.Yu., Gopkalo, E.E. (2018) Results of studying the causes for cracking in titanium alloy blades of steam turbines of K-1000-60/3000 type. *Tekh. Diagnost. ta Neruiviv. Kontrol*, 2, 3–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2018.02.01> [in Russian].
2. Kanel, G.I., Razorenov, S.V., Fortov, V.E. (2004) *Shok-Wave phenomena and the properties of condensed matter*. New-York, Berlin, Heidelberg, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4282-4>
3. (2004) SO 153-34.17.462-2003 *Control by etching method blades of TS5 alloy after removal of erosion wear. Instruction*. Moscow, Minenergo RF [in Russian].
4. Bilous, V.A., Voevodin, V.M., Khoroshikh, V.M. et al. (2016) Development of experimental equipment and main technological procedures for producing cavitation-resistant coatings on working surfaces of blades of steam turbines from titanium alloy VT6 for replacement of similar imported products. *Nauka ta Innovatsii*, 12(4), 27–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin12.04.027>
5. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding J.*, 3, 7–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.02>
6. Makhnenko, O.V., Ananchenko, N.S., Kandala, S.M. et al. (2018) Prediction of structure and mechanical properties of VT6 titanium alloy at layer-by-layer formation of 3D products using additive technology of electron beam surfacing. *Mechanics and Advanced Technologies*, 3(84), 5–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.84.144127>
7. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2018) Prediction of kinetics peculiarities of thermodeformational state of compacts specimens of different geometry at their layer-by-layer formation in equipment xBeam 3D Metal Printer. In: *Proc. of 9th Int. Conf. on Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes*, 68–76.

RECONDITIONING REPAIR OF STEAM TURBINE BLADES USING ADDITIVE TECHNOLOGY

O.V. Makhnenko, G.Yu. Saprykina, O.M. Savytska, M.S. Ananchenko

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str, Kyiv, 03150, Ukraine.

E-mail: oleh.makhnenko@gmail.com

It is rational to use additive technology to perform repair of critical structural elements, which include titanium alloy blades of powerful steam turbines, which is due to high requirements to product quality, namely the need to ensure the required microstructure and mechanical properties of blade material, as well as a low level of the residual stress-strain state and oxidation of material surface. Application of mathematical modeling methods based on computer technologies allows reduction of the scope of experimental studies and ensuring the required quality of repair, which guarantees a certain reliability and serviceability of the blades after repair. 7 Ref., 7 Fig.

Keywords: steam turbine, blade, titanium alloy, reconditioning repair, additive technology, electron beam surfacing, computational prediction

Надійшла до редакції 20.10.2023