

УДК 621.785

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241120.45.690

КОРОЗИЙНА СТІЙКІСТЬ ЗМІЦНЕНИХ ШАРІВ ЛОПАТОК ПАРОВИХ ТУРБІН ЗІ СТАЛІ 15X11МФ

ГЛУШКОВА Д. Б.¹, докт. наук з держ. упр., проф.,
ГРИНЧЕНКО О. Д.^{2*}, здобувач

¹Кафедра технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-37-29, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

^{2*}Кафедра технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-37-29, e-mail: grinchenkoelenad@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0872-6407

Анотація. Постановка проблеми. Надійність роботи лопаткового апарата парових турбін великою мірою визначає роботу турбіни в цілому. Результати наукових досліджень свідчать що поверхнєве спрацювання робочих лопаток у волого – паровому потоці спричинюється поєднанням корозії і краплеударної ерозії. Наявність у робочому тілі хімічних елементів і сполук інтенсифікує процес зносу лопаток. Відчутно впливає на характеристики зносу значення рН робочого середовища, яке може сильно коливатися в процесі експлуатації. Складне явище, таке як руйнування поверхні пера лопатки в результаті впливу агресивних чинників середовища вимагає експериментальних досліджень. Одним із шляхів зниження ерозійного зносу робочих лопаток є підвищення ефективності антиерозійних властивостей за рахунок формування на вхідних кромках захисних шарів, здатних протистояти впливу експлуатаційних факторів. **Мета статті** – проаналізувати вплив способів зміцнення вхідних кромek лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ на корозійну стійкість. **Висновок.** Проведено корозійні випробування зразків лопаток, вхідні кромки яких зміцнені трьома способами: струмами високої частоти, електроіскровим легуванням сплавом Т15К6, електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ. За результатами випробувань найменшу швидкість корозії має шар, зміцнений загартуванням струмами високої частоти, найбільшу – шар, зміцнений електроіскровим легуванням твердим сплавом Т15К6. Швидкість корозії шару, зміцненого електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ, у 2,1 менша, ніж шару, зміцненого сплавом Т15К6.

Ключові слова: лопатка турбіни; зміцнений шар; мікроструктура; швидкість корозії

КОРРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН ИЗ СТАЛИ 15X11МФ

ГЛУШКОВА Д. Б.¹, докт. техн. наук, проф.,
ГРИНЧЕНКО Е. Д.^{2*}, соискатель

¹Кафедра технологии металлов и материаловедения, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харьков, Украина, тел. +38 (057) 707-37-29, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

^{2*}Кафедра технологии металлов и материаловедения, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харьков, Украина, тел. +38 (057) 707-37-29, e-mail: grinchenkoelenad@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0872-6407

Аннотация. Постановка проблемы. Надежность работы лопаточного аппарата паровых турбин в значительной степени определяет работу турбины в целом. Результаты научных исследований свидетельствуют о том, что поверхностный износ рабочих лопаток во влажно-паровом потоке вызывается сочетанием коррозии и каплеударной эрозии. Наличие в рабочем теле химических элементов и соединений интенсифицирует процесс износа лопаток. Ощутимое влияние на характеристики износа имеет значение рН рабочей среды, которое может сильно колебаться в процессе эксплуатации. **Цель статьи** – проанализировать влияние способов упрочнения входных кромок лопаток паровых турбин из стали 15X11МФ на коррозионную стойкость. **Вывод.** Проведены коррозионные испытания образцов лопаток, входные кромки которых упрочнены тремя способами: токами высокой частоты, электроискровым легированием сплавом Т15К6, электроискровым легированием сталью 15X11МФ-Ш. По результатам проведенных испытаний, наименьшую скорость коррозии имеет слой, упрочненный закалкой токами высокой частоты, наибольшую – слой, упрочненный электроискровым

легируванням твердим сплавом Т15К6. Скорість корозії слоя, упрочненого електроискровим легируванням сталью 15Х11МФ в 2,1, менше, чем слоя, укрєпленного сплавом Т15К6.

Ключевые слова: лопатка турбины; упрочненный слой; микроструктура; скорость коррозии

CORROSION OF STEAM TURBINE BLADES MADE OF STEEL 15X11MФ

HLUSHKOVA D.B.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
HRINCHENKO O.D.^{2*}, *External Cand.*

¹ Department of Metals Technology and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho Str., 61002, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (057) 707-37-29, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

^{2*} Department of Metals Technology and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho Str., 61002, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (057) 707-37-29, e-mail: grinchenkoelenad@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0872-6407

Abstract. Problem statement. The reliability of the vane apparatus of steam turbines largely determines the operation of the turbine as a whole. The results of scientific research indicate that the surface operation of the blades in the wet-steam flow is caused by a combination of corrosion and drip erosion. The presence of chemical elements and compounds in the working fluid intensifies the process of blade wear. This problem is especially acute for the blades of the last stages of low-pressure cylinders, corrosion and erosion wear of which largely determines the service life of their work. A complex phenomenon, such as the destruction of the surface of the scapula feather as a result of aggressive environmental factors requires experimental studies. One of the ways to reduce the erosion wear of the blades is to increase the efficiency of anti-erosion properties by forming on the inlet edges of the protective layers that can withstand the effects of operational factors. **The purpose of the article.** Analysis of the influence of methods of strengthening the inlet edges of steam turbine blades made of steel 15X11MФ on corrosion resistance. **Conclusion.** Corrosion tests of blade samples were carried out, the inlet edges of which were strengthened in three ways: high current amplification, electrospark alloying with T15K6 alloy, electrospark alloying with steel 15X11MФ According to the results of the tests, the layer strengthened by hardening by high-frequency currents has the lowest corrosion rate, the layer strengthened by electrospark alloying with T15K6 hard alloy has the highest. The corrosion rate of the layer reinforced by electrospark alloying of steel 15X11MФ is 2,1 less than that of the layer reinforced with T15K6 alloy.

Keywords: turbine blade; hardened layer; microstructure; corrosion rate

Постановка проблеми. У комплексі питань, що визначають надійність і економічність роботи турбін теплових і атомних електростанцій, велике значення має надійність лопаткового апарата – найдорожчого елемента турбіни, який найчастіше пошкоджується. Умови їх роботи вимагають підвищеної твердості вхідних кромки, високої ерозійної стійкості, відсутності негативного впливу параметрів формування захисного покриття на механічні властивості, високих корозійних властивостей [1].

Особливо гостро ця проблема стоїть для робочих лопаток останніх ступенів циліндрів низького тиску, корозійно-ерозійний знос яких багато в чому визначає ресурс їх роботи.

Корозійні пошкодження лопаток спостерігаються різною мірою на обладнанні всіх типів турбін. Це пов'язано з тим, що в паровому середовищі завжди

містяться корозійно-активні речовини, від кількості яких залежить швидкість розвитку пошкоджень.

Корозійні пошкодження у вигляді пітингів і виразок являють собою концентратори напружень. Залежно від їх розміру, кількості і місця розташування починається руйнування робочих лопаток і дисків. За значних втрат металу внаслідок корозії знижуються міцнісні характеристики лопаток і змінюються власні частоти коливань. Утворення таких пошкоджень у процесі експлуатації відбувається зазвичай на ступенях, розташованих у зоні фазового переходу, і рідше в зоні вологої пари.

У разі тривалих простоїв турбіни пітинги і виразки можуть утворюватися по всій проточній частині турбіни (стоянкова корозія), а поблизу відборів, дренажів і запірної арматури – найінтенсивніше. Це наслідок конденсації пари, що надходить на

поверхні проточної частини непрацюючої турбіни через нещільно закриту або дефектну арматуру дренажів, відборів і т. п.

Аналіз результатів обстежень металу дисків і лопаткового апарата турбін показав, що значні корозійні пошкодження дисків і робочих лопаток у процесі експлуатації відбуваються тільки на ступенях турбін, що працюють у зоні фазового переходу (зона вологої пари від стану сухої насиченої пари

до вологості складає близько 6 %). Таких корозійних пошкоджень дисків і робочих лопаток у процесі роботи турбіни в області перегрітої пари не виявлено.

Результати наукових досліджень, виконаних в останні роки [2; 3], свідчать, що поверхневе спрацювання робочих лопаток у волого-паровому потоці викликається поєднанням корозії і краплеударної ерозії (рис. 1).

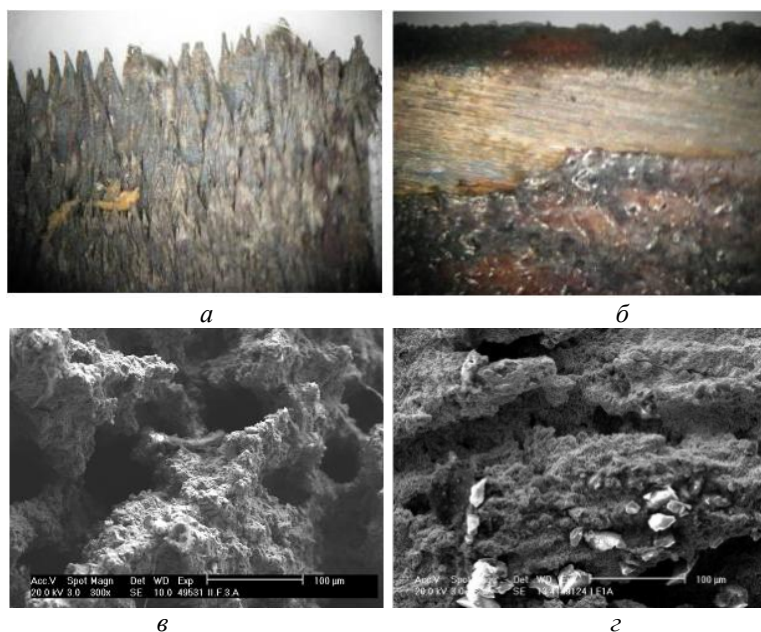


Рис. 1. Руйнування вхідних кромки лопаток парових турбін останніх ступенів циліндрів низького тиску у процесі експлуатації: а, б – $\times 2$; в, г – $\times 200$

Наявність у робочому тілі хімічних елементів і сполук інтенсифікує процес ерозійного зносу. Відчутно впливає на характеристики ерозійного зносу значення рН робочого середовища, яке може сильно коливатися у процесі експлуатації.

Через серйозні наслідки корозійно-ерозійного руйнування вхідних кромки лопаток для терміну служби і продуктивності турбіни необхідно краще зрозуміти механізми деградації поверхні лопаток. Таке складне явище як руйнування поверхні пера лопатки в результаті впливу агресивних чинників середовища, вимагає експериментальних досліджень. Одним із шляхів зниження ерозійного зносу робочих лопаток бачиться підвищення ефективності антиерозійних властивостей шляхом формування на вхідних кромках захисних шарів, здатних протистояти впливу експлуатаційних факторів.

Аналіз публікацій [1–4] показав, що проблема ерозійно-корозійного пошкодження робочих лопаток, що зазнають у процесі експлуатації впливу складного спектра малоциклових і високочастотних термомеханічних навантажень, актуальна вже понад 70 років, але дотепер вона вирішена частково, тому дослідження в галузі захисних шарів лопаток постає важливим аспектом у вирішенні цієї проблеми.

Мета статті – дослідити стан поверхневого шару робочої лопатки парової турбіни зі сталі 15X11МФ, після зміцнення струмами високої частоти, електроіскровим легуванням сплавом Т15К6, електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ-Ш, оцінити корозійну стійкість зміцнених ділянок пера лопатки, виконати порівняльну оцінку властивостей захисних шарів.

Результати досліджень. Із метою визначення корозійної дії середовища відібрано проби води на АЕС турбіни К 220-

44-2. Значення кислотності проб та електричної провідності води наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювання кислотності води рН і електричної провідності

Номер зразка	рН зразків проб води	Електрична провідність води, сіменс, $G, \mu S cm^{-1}$
1	11,09	580
2	10,34	235
3	11,55	810
4	10,31	210
5	9,4	20,5
6	9,7	14,5
7	9,7	15,0
8	9,81	22,5
9	9,65	17,0

У всіх відібраних зразках $pH > 7$, значення кислотності коливаються від 9,4 до 11,55, що за значеннями рН відповідає лужному (основному) розчину. Електрична провідність змінюється в досить значних межах: у зразках 1–4 провідність змінюється від 210 до 810 G , у зразках 5–9 від 14,5 до 22,5 G , що свідчить про неоднорідність води за вмістом домішок. Також визначали вміст аніонів в отриманих зразках води.

Результати вимірювань показали надзвичайно велику кількість іонів металів і вміст Al, Fe, Cr, Ni, Cu, Zn. Електромагнітною пасткою знайдено Cr, W, вміст яких може бути тільки результатом деякої корозії, ерозії лопаток, що цілком логічно: лопатки виготовлені з хромонікелевої сталі 15X11МФ, вхідні кромки зміцнені сплавом Т15К6 на основі карбиду вольфраму.

Присутність у пробах води домішок металів вказує на перебіг ерозійних процесів під час експлуатації лопаткового апарата турбін. Нітрити та нітрати присутні в концентрації іонів у дуже невеликих кількостях.

Відповідно до отриманих результатів якості води для досліджень обрано корозійне середовище HN_3 з кислотністю рН 9,6.

Виконано дослідження зразків від лопаток, вхідна кромка яких була зміцнена різними методами: загартуванням СВЧ із наступним відпуском (зразок 1), електроіскровим легуванням (ЕІЛ) традиційним сплавом Т15К6 (зразок 2), електроіскровим легуванням сталлю, ідентичною матеріалу лопатки, 15X11МФ-Ш (зразок 3). Зразки були виготовлені з лопаток 5-го ступеня зі сталі 15X11МФ (рис. 2).

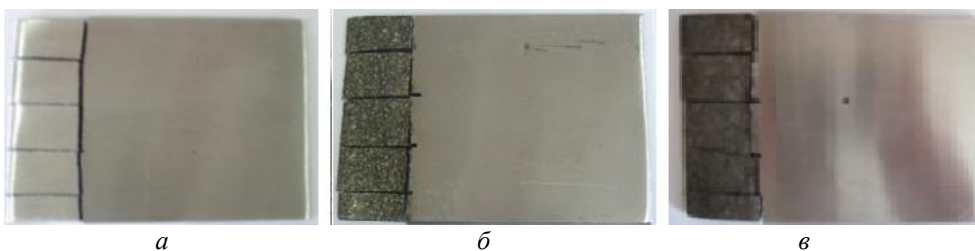


Рис. 2. Вид досліджуваних зразків: а – зразок 1, б – зразок 2, в – зразок 3

Дослідження стану поверхні зразків лопатки в зоні зміцнення виконувалося на двох ділянках, маркованих як «позиція 1» і

«позиція 2». Частина зразка «позиція 1» перебувала в середовищі пари, частину зразка «позиція 2» занурили у водний

розчин із кислотністю рН 9,6. Стан поверхні зразка до випробувань фіксували за допомогою SEM-зображення.

SEM-зображення зразка 1, загартованого СВЧ, показані на рисунку 3 за збільшень $\times 50$ $\times 1\ 000$ до впливу корозійного

середовища. Стан поверхні вивчено після витримки протягом 28 днів в агресивному середовищі. Така тривалість витримки не спричинила значного пошкодження поверхні лопатки.

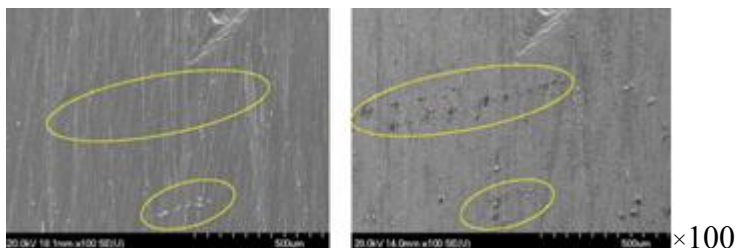


Рис. 3. Зразок 1, позиція 2:

а – перед випробуванням на витримку до впливу корозійного середовища; *б* – після випробування

Під час огляду поверхні зразка, зміцненого ЕІІ сплавом Т15К6, виявлено, що поверхня дуже неоднорідна (рис. 4), навіть при нерівностях, виявлених за збільшень із низькою роздільною здатністю, на обробленій поверхні є отвори (кратери). Це зумовлено тим, що під час електроіскрового легування відбувається

локальний розігрів металу й утворюються мікроскопічні усадкові раковини. Такий рельєф характерний для цього типу зміцнення поверхні. Корозійне руйнування відбувається локально, переважно на межі переходу до основного металу лопатки (рис. 5).

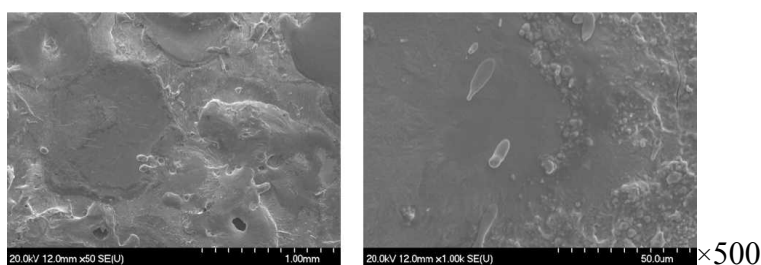
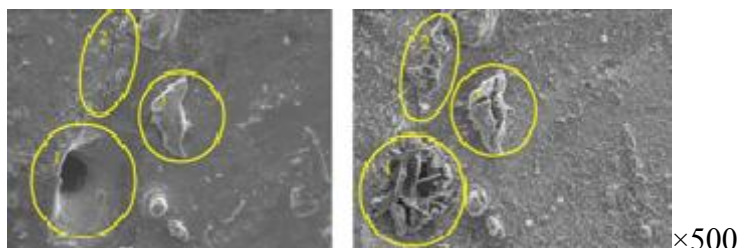


Рис. 4. Зразок 2 перед випробуванням на витримку до впливу корозійного середовища



а

б

Рис. 5. SEM-зображення зразка 2, позиція 1 у положенні 2:

а – до; *б* – після випробування

Поверхня зразка, зміцненого ЕІЛ сталлю 15X11МФ, також неоднорідна, як і на зразку 2, що характерно для електроіскрової обробки поверхні.

Хоча корозія вплинула на всю поверхню, утворився відносно товстий шар корозії зі

значними локальними відмінностями. На рисунку 6 це проілюстровано більш детально. По краях отворів помітне накопичення корозійного продукту: осадження деякої кількості солі, оксиду в отворах і ребрах.

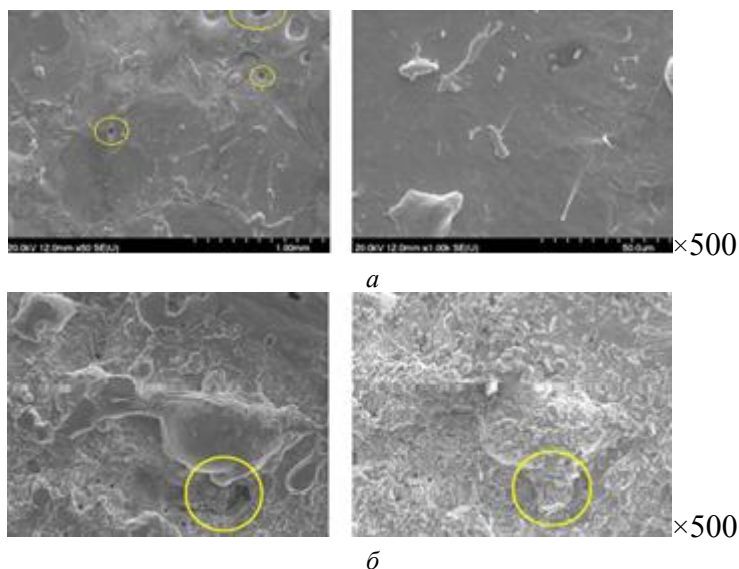


Рис. 6. SEM зображення зразка 3 в положенні 2: а – до; б – після випробування

Для електрохімічних корозійних випробувань використовували електроди з геометричною площею поверхні 0,5...1 см², виготовлені від зразка лопатки. Сторони без поверхневої обробки були замасковані епоксидним клеєм. Вимірювання проводили в азотно-кисневому розчині, кислотність якого доводили до рН 9,6 за допомогою аміаку за 25 °С. Безкисневу аміачну замкнуту систему нагрівали до 50 °С, після стабілізації потенціалу розімкнутого ланцюга спочатку визначали опір розчину

між робочим електродом і електродом порівняння (зазвичай 2...5 кОм) шляхом вимірювання імпедансу. Потім проводили катодну й анодну поляризацію від потенціалу розімкнутого ланцюга в діапазоні ±250 мВ. Залежно від поточних значень потенційні дані були скориговані за допомогою падіння омичного потенціалу.

Побудовано діаграми Еванса і визначено швидкість корозії для кожного типу зміцнення (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння показників корозії зразків

Зразок	Метод зміцнення	E _{korр}	j _{korр}	β _a	β _k	Швидкість корозії
№		mV	A cm ⁻²	mV	mV	мкм/рік
1	СВЧ	-255	3,5·10 ⁻⁸	300	180	0,4
2	ЕІЛ Т15К6	-602	2,3·10 ⁻⁶	220	335	12,0
3	ЕІЛ 15X11МФ	-410	4,9·10 ⁻⁷	400	220	5,6

Висновки. Проведено корозійні випробування зразків лопаток, входні кромки яких зміцнені трьома способами: зміцненням струмами високої частоти,

електроіскровим легуванням сплавом Т15К6, електроіскровим легуванням сталлю 15Х1МФ-Ш.

Визначено морфологічні параметри поверхневих шарів зразків. Порівняння морфологічного, композиційного і корозійного аналізу зразків показало, що зразок, зміцнений сплавом Т15К6 методом електроіскрового легування, гірший із точки зору опору корозії.

Фактично, нерівномірна корозія зразків, зміцнених електроіскровим легуванням, порівняно зі зразком, зміцненим струмами високої частоти, більш висока. У цих зразках виявлено чутливість до локальної корозії,

тому важливо для виконання технологічних операцій електроіскрового легування отримувати шари з максимальною щільністю модифікованих легувальним електродом ділянок.

За результатами проведених випробувань найменшу швидкість корозії має шар, зміцнений загартуванням струмами високої частоти, найбільшу – шар, зміцнений електроіскровим легуванням твердим сплавом Т15К6. Швидкість корозії шару, зміцненого електроіскровим легуванням сталлю 15Х1МФ, у 2,1 раза менша, ніж у шару, зміцненого сплавом Т15К6.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шубенко А. Л., Ковальський А. Э. Каплеударная эрозия лопаточных аппаратов паровых турбин. Прогнозирование и методы защиты. *Вестник национального технического университета ХПИ. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. Харьков : НТУ ХПИ, 2012. № 7. С. 76–87.
2. Севидова Е. К., Мацевитый В. М., Казак И. Б., Вакуленко К. В. Оценка защитных свойств многослойных покрытий для лопаток паровых турбин. *Электронная обработка материалов*. 2007. № 6. С. 4–9.
3. Bashar O. Enhancement of Corrosion Resistance in Steam Turbines Blades B. *Nanoparticles Coatings Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES)*. Vol. 20, № 5. 2017. Pp.1172–1181.
4. Виноградова С. С., Кайдриков Р. А., Журавлев Б. Л. Расчет показателей коррозии и параметров коррозионных систем. Казань : КНИИТУ, 2013. 176 с.
5. Мингажев А. Д., Новиков А. В., Криони Н. К., Бекишев Р. Р. Защитное покрытие для лопаток паровых турбин. *Нефтегазовое дело* : электронный научный журнал. 2014. № 4. С. 257.

REFERENCES

1. Shubenko A.L. *Kapleudarnaya e`roziya lopatochny'h apparatov parovy'h turbin. Prognozirovanie i metody' zasch'ity'* [Droplet impact erosion of steam turbine blades. Forecasting and protection methods]. *Vestnik nacional'nogo tehnicheskogo universiteta «ХПИ». `Energeticheskie i teplotekhnicheskie processy i oborudovanie* [Bulletin of National Technical University "KhPI". Energy and Heat Engineering Processes and Equipment]. No. 7, Kharkiv : NTU "KhPI", 2012, pp.76–87. (in Russian).
2. Sevidova E.K., Matsevity V.M., Kazak I.B. and Vakulenko K.V. *Ocenka zasch'itny'h svoystv mnogoslouny'h pokry'tiy dlya lopatok parovy'h turbin* [Evaluation of the protective properties of multilayer coatings for steam turbine blades]. *E`lektronnaya obrabotka materialov* [Electronic material processing]. 2007, no. 6, pp. 4–9. (in Russian).
3. Bashar O. Enhancement of Corrosion Resistance in Steam Turbines Blades B. *Nanoparticles Coatings Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES)*. Vol. 20, no. 5, 2017, pp. 1172–1181.
4. Vinogradova S.S., Kaidrikov R.A. and Zhuravlev B.L. *Raschet pokazateley korrozii i parametrov korroziorny'h sistem* [Calculation of corrosion indicators and parameters of corrosion systems]. Kazan : KNIITU, 2013, 176 p. (in Russian).
5. Mingazhev A.D., Novikov A.V., Krioni N.K. and Bekishev R.R. *Zasch'itnoe pokry'tie dlya lopatok parovy'h turbin* [Protective coating for steam turbine blades]. *Neftgazovoe delo : E`lektronnny'y nauchny'y jurnal* [Oil and Gas Business : electronic scientific journal]. 2014, no. 4, 257 p. (in Russian).

Надійшла до редакції 02.11.2020.