ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ

Девіз «ТУРБІНА»

2021

Зміст

Вступ 3

Актуальність роботи 4

1. Умови роботи лопаток турбін 4

1.2 *Методи зміцнення лопаток* 5

2. Матеріал та методика дослідження 8

2.1 Матеріали лопаток турбін 8

2.2 Методики дослідження мікроструктури за допомогою оптичного мікроскопу, вимірювання мікротвердості 9

3. Вплив зміцнення на корозійну стійкість лопаток турбін 10

3.1. Дослідження корозійної стійкості шару, загартованого струмом високої частоти (СВЧ) 11

3.2 Дослідження корозійної стійкості шару, зміцненого електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш 15

4. Промислові випробування в реальних умовах експлуатації 22

Висновки 25

Перелік посилань 26

Вступ

Сучасні завдання створення й модернізації енергетичного устаткування висувають високі вимоги до вдосконалювання показників економічності й надійності турбін. Корозійне руйнування вхідних кромок робочих лопаток останніх ступенів низького тиску потужних парових турбін є одним з основних факторів, що визначають працездатність і економічність лопаткового апарата й турбіни в цілому. Лопатковий апарат, особливо у роторів низького тиску, як найбільш складної й високонавантаженої частини турбіни, значною мірою визначає надійність усього агрегату. Крім того, лопатка останнього шару циліндра низького тиску визначає поріг граничної потужності турбіни. Створення надійного лопаткового апарата представляє комплексне завдання в області міцності, газодинаміки, вібрації, протиерозійного захисту з обов'язковим відпрацьовуванням лопаток у стендових умовах.[1].

Одним з найважливіших питань є розробка ефективних методів захисту лопаткових апаратів від корозії при одночасному зниженні механічних втрат, які були викликані вологістю.

Актуальність роботи

Наявність рідкої фази в робочому тілі парових турбін викликає корозійне зношування елементів проточної частини.

Ефективність розроблених до теперішнього часу способів протикорозійного захисту ступенів, в основному, визначається накопиченим тієї або інший фірмою власним досвідом здійснення протикорозійних заходів [2-4].

Предметом розгляду в даній роботі є дослідження можливості застосування як матеріалу для зміцнюючого електрода сталі 15Х11МФ-Ш при виконанні електроіскрового легування вхідної кромки робочої лопатки парової турбіни з метою захисту від впливу корозії при експлуатації в зоні фазового переходу.

У даній роботі ставили перед собою завдання досліджувати стан поверхневого шару робочої лопатки парової турбіни зі сталі 15Х11МФ-Ш, зміцненої струмами високої частоти, з метою удосконалення існуючих технологій захисту вхідних кромок лопаток турбін.

У зв’язку з цим представлена робота є своєчасною та актуальною.

І. Умови роботи лопаток турбін

Основою частиною турбіни, яка визначає її економічність та надійність, є проточна частина. Найбільш відповідальними елементами проточної частини є робочі лопатки, які утворюють робочу решітку. У каналах робочої решітки відбувається перетворення кінетичної енергії потоку парі в роботові обертання на валу турбіни рис. 1.1.

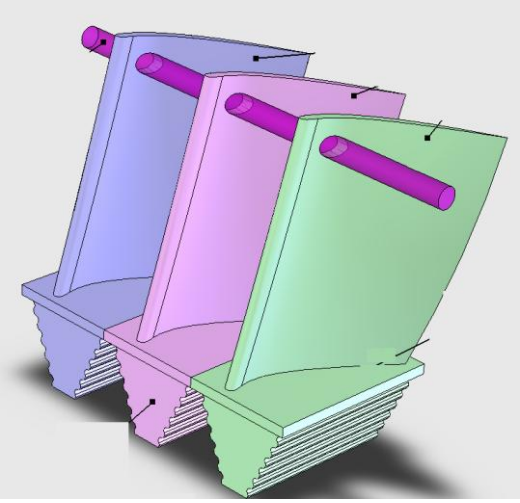


Рис.1.1 Загальний вигляд лопаток турбін

Робоча лопатка працює в дуже важких умовах, які обумовлюються дією різних факторів.

Для робочих лопаток турбін АЕС та останніх ступенів турбін ТЕС дуже небезпечною є корозія, яка призводить до зношення їх поверхонь.

Агресивні домішки, які є в парі, визивають корозію та зниження опору дії сталих та змінних напруг.

1.2 Методи зміцнення лопаток

Для захисту робочих лопаток від корозійного руйнування використовуються наступні способи:

1) зниження вологості пари на виході з турбіни, яке досягається підвищенням температури свіжої пари, застосуванням проміжного перегріву пари, використанням сепараторів, які виносяться у комбінації із проміжним пароперегрівником для волого-парових турбін АЕС;

2) відмова від бандажних дротів, що сприяють концентрації вологи;

3) застосування корозійно стійких матеріалів, зміцнення поверхні лопаток, використання захисних покриттів.

Рис.1.2 Знос вхідної кромки лопатки

З метою збільшення терміну служби лопаток вхідні кромки останніх зміцнюють різними способами: зміцнення загартуванням струмами високої частоти, електроіскрове легування твердими сплавами на основі карбідів W, Ti, приварку стеллитових пластин, іонна імплантація з формуванням на поверхні покриття Tin, дозвукове й надзвукове плазмове напилювання зносостійких покриттів і т.п.

У теперішній час використовують в якості зміцнюючого електрода широко розповсюджений сплав Т15 ДО6 для лопаток, що працюють у турбінах першого контуру, спосіб іонної імплантації припускає використання дорогого вакуумного устаткування [4].

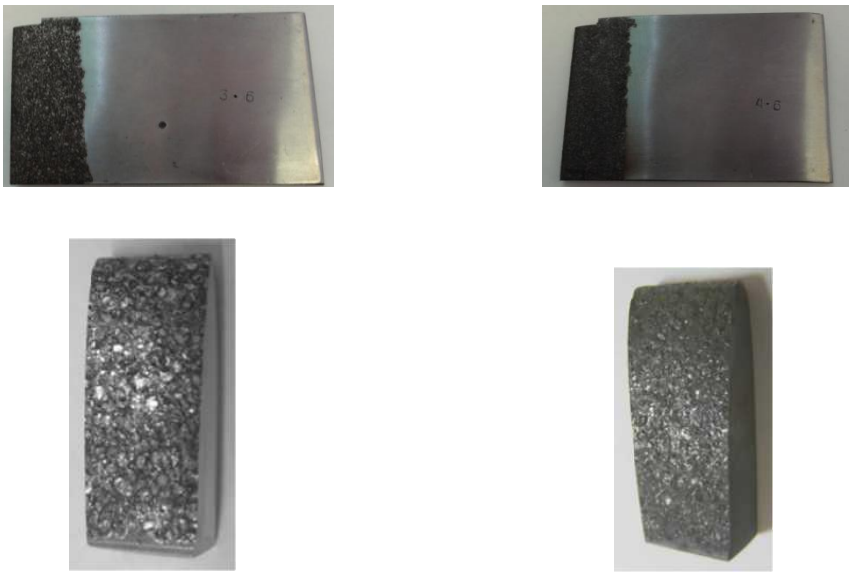


Рис1.3 - Зразок лопатки, зміцненої сплавом Т15 ДО6 метод електроіскрового легування

У зв'язку з актуальністю питання підвищення корозійної стійкості лопаток парових турбін, були проведені роботи з удосконалення наявних технологій захисту вхідних крайок робочих лопаток останніх ступенів низького тиску

Рис.1.4 Метод електроіскрового легування

При електроіскровому легуванні у результаті електричного пробою між електродного проміжку виникає іскровий розряд, у якому потік електронів приводить до локального розігріву електрода (анода).

На поверхні катода під дією значних теплових навантажень здійснюється перемішування матеріалу катода й анода, що сприяє утвору високої адгезії між основою й формованим шаром.

Роботи зі зміцнення зразків були виконані на електроіскровій установці моделі ЕІЛ 8А по режиму: (амплітудне значення струму імпульсу I=175±10 А, енергія імпульсу $E_{им}$=3,15 Дж, тривалість імпульсу $t_{им}$=1000 мкс, частота 600Гц)

2. Матеріал та методика дослідження

2.1 Матеріали лопаток турбін

У якості матеріалу для дослідження була обрана корозійностійка хромиста сталь 15Х11МФ-Ш, яка застосовується для виготовлення робочих лопаток останніх ступенів роторів низького тиску.

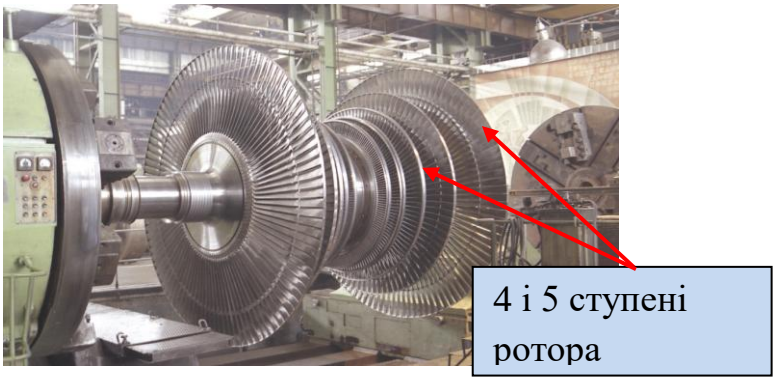


Рис 2.1 Ротор низького тиску з лопатками

Дослідження проводилося на зразках від заготовок лопаток зі сталі 15Х11МФ-Ш, виготовлених методом штампування й термооброблених до твердості 271НВ. Матеріал зразків має наступні механічні властивості (таблиця 2.2).

Таблиця 2.1- Хімічний склад сталі 15Х11МФ-Ш

	Вміст хім. елементів, %								
	C	Cr	Ni	Mo	V	Si	Mn	S	P
Фактичний склад	0,14	10,58	0,26	0,63	0,3	0,18	0,33	0,013	0,022
Вимоги ДСТУ5632	0,12-0,19	10,0-11,5	–	0,6-0,8	0,25-0,4	≤ 0,5	≤ 0,7	≤0,025	≤0,03

Таблиця 2.2 - Механічні властивості лопатки

	$\sigma_{0,2}$, Н/мм^2	$\sigma_в$, Н/мм^2	δ_5, %	Ψ, %	KCU, Дж/см^2	HB
Результати випробувань	669	827	20	58	116	271
Вимоги ОСТ 108.020.03-82	666,4-813,4	≥814	≥13	≥40	≥39,2	248-285

Міцність лопаток знаходиться на потрібному рівні, що забезпечується зміцненням твердого розчину легуючими елементами: хромом, молібденом та ванадієм.

Термічна обробка для отримання необхідних властивостей складається з загартування з температур 1000 ± 10 °С у масло та відпуску при 700 ± 10 °С.

2.2 Методики дослідження мікроструктури за допомогою оптичного мікроскопу, вимірювання мікротвердості

Дослідження мікроструктури сталі проводили за стандартною методикою на мікроскопі МІМ-8 з використанням збільшення ×100-1000 з фіксуванням на стандартну фотопластину та на мікроскопі ММО-1600 з фіксуванням зображення за допомогою цифрової фотокамери.

При вимірюванні мікротвердості використовують незначні по величині навантаження (від 2 до 200 г), що сприятливе для вивчення мікроскопічної будови матеріалу.

У якості вдавлюваного індентора в приладі ПМТ-3 використовується алмазна пірамідка з квадратною основою та кутом при основі 136 º. При випробуванні виміряють довжину діагоналі відбитка та підраховують число твердості за наступною формулою:

$$\acute{I} = \frac{P}{S} = \frac{2P\sin\alpha/2}{d^2} = 1{,}854\frac{P}{d^2} \qquad (2.1)$$

де: І-величина твердості; S - площа вдавлювання індентору; P - сила з якою вдавлюється індентор; d- діаметр відбитку;

3. Вплив зміцнення на корозійну стійкість лопаток турбін

Проблема корозійного руйнування лопаток останніх ступенів парових турбін значною мірою обумовлена агресивним впливом корозійного середовища.

З метою визначення корозійної дії середовища відібрано проби води на АЭС турбіни К220-44-2. Значення кислотності проб води наведені в табл.3.1.

Таблиця 3.1 − Результати вимірювання кислотності води pH і електричної провідності

Номер зразка проби води	**pH**	**G** **μ S cm^{-1}** **електрична провідність води, сіменс**
01RS1	11,09	580
01RS2	10,34	235
02RS1	11,55	810
02RS2	10,31	210
41NX01	9,4	20,5
41NX02	9,7	14,5
41NX03	9,7	15,0
41NX04	9,81	22,5
41NX05	9,65	17,0

У всіх відібраних зразках pH> 7, значення кислотності коливаються від 9,4 до 11,55, що за значеннями pH відповідає лужному (основному) розчину. Електрична провідність змінюється в досить значних межах: в зразках серії 01RS1 і 02RS1 провідність змінюється від 210 до 810 G, в зразках серії NX від 14,5 до 22,5 G, що свідчить про неоднорідність води по вмісту домішок. Також визначали вміст аніонів у отриманих зразках води.

Вимірювання порівнювали з результатами двох «порожніх тестів», тобто з контейнером очищеного зразка, (вода була оброблена фільтром MilliPore, MilliQ, азотною кислотою, MilliQ). В таблиці 3.2 показані ці результати.

Таблиця 3.2 – Визначення вмісту іонів у зразках

Номер зразка	Вміст іонів (мг дм$^{-3}$)							
	Ацетат	Форміат, (пропіонат)	Cl	NO_2^-	Br^-	NO_3^-	SO_4^-, SO_3^-	PO_4^-
01RS1	0,15	0,16	0,05	5,28	-	0,55	0,04	-
01RS2	-	0,04	0,1	0,07	-	0,16	0,03	-
02RS1	-	-	0,07	21,6	-	9,88		-
02RS2	-	0,02	0,04	0,04	-	0,13	0,02	-
41NX01	-	0,02	0,04	0,04	-	0,13	0,02	-
41NX02	-	-	0,01	-	-	-	-	-
41NX03	0,07	0,04	0,01	-	-	0,01	-	-
41NX04	0,07	0,04	-	-	-	0,015	-	-
41NX05	0,09	0,05	-	-	-	-	-	-

Присутність в пробах води домішок металів свідчить про протікання корозійних процесів при експлуатації лопаткового апарату турбін.

Відповідно до отриманих результатів якості води при дослідженнях обрано корозійне середовище HN_3 з кислотністю pH 9,6.

Виконано дослідження зразків від трьох лопаток, вхідна кромка яких була зміцнена різними методами: загартуванням СВЧ з наступним відпуском (зразок 1), електроіскровим легуванням традиційним сплавом Т15К6 (зразок 2), електроіскровим легуванням сталлю, ідентичною матеріалу лопатки, 15Х11МФ-Ш (зразок 3). Зразки були вирізані з лопаток 5 ступеню зі сталі 15Х11МФ.

3.1. Дослідження корозійної стійкості шару, загартованого струмом високої частоти (СВЧ)

Зразки для дослідження вирізалися із зони вхідний кромки лопатки 5 ступеню ротора низького тиску, зміцненої загартуванням струмами високої

частоти за представленими вище режимам.

На рис. 3.1 представлений зовнішній вигляд зразка лопатки, вхідна кромка якої зміцнена струмом високої частоти (СВЧ).

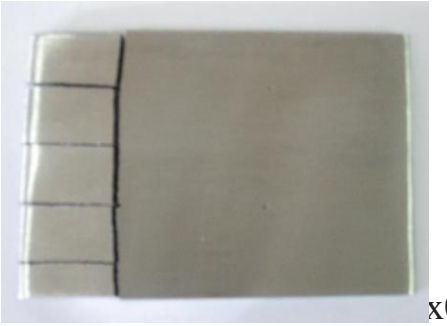

x0,3

Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд зразка лопатки, зміцненого СВЧ

Стан поверхні зразка до випробувань фіксувалося за допомогою SEM-зображення. SEM-зображення зразка показані на рис.3.2 при збільшеннях 50х 1000х до впливу корозійного середовища. Можна бачити, що поверхня досить однорідна, гладка, без механічних пошкоджень. Пори, тріщини при цьому розділенні оптичного зображення не виявляються.

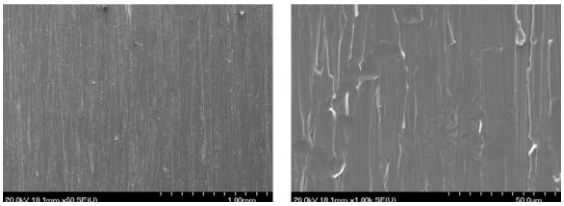

а б

Рисунок 3.2 – SEM-зображення поверхні зразка , загартованого СВЧ:
а – збільшення 50х; б – збільшення 1000х

Для аналізу структурного стану і визначення фазового складу з поверхні зразків були зняті рентгенівські дифрактограми. XDR спектр зразка, зміцненого СВЧ, показаний на рис.3.3.

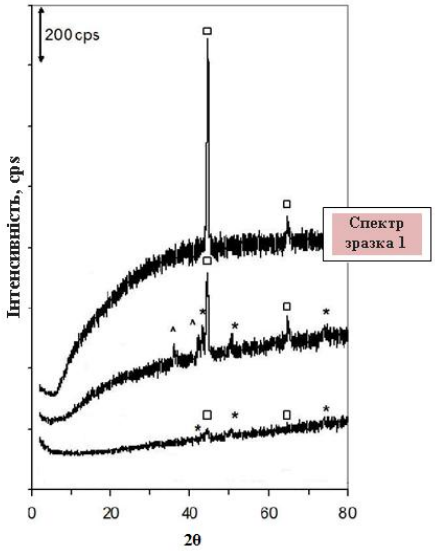


Рисунок 3.3 – Рентгенівські дифрактограми поверхні досліджуваних зразків. Ідентифіковані фази: □ – (ферит), * (аустеніт), ˆ (нестехіометричний нітрид титану, карбід)

Аналіз хімічних елементів по глибині зразка лопатки, зміцненого струмами високої частоти показано на рис. 3.4.

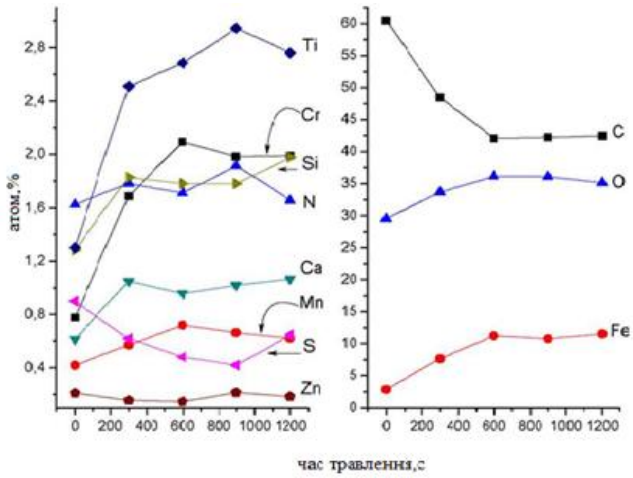


Рисунок 3.4 – Аналіз хімічних елементів по глибині зразка, травлення при 2 кеВ променями Ar +

Склад зразка відповідає корозійностійкій сталі 15Х11МФ з вмістом хрому близько 10%, поверхня зразка покрита пасивним оксидом хрому. Порівняння EDS-аналізу (енергетична дисперсійна рентгенівська спектроскопія) зразка до і після випробування показано в табл. 3.3. Абсолютні відсотки інг-

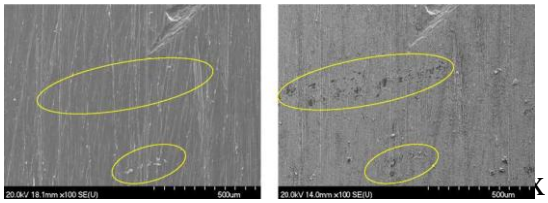
редієнтів не є абсолютно точними (не містять всі елементи), але їх частка є інформативною.

Таблиця 3.3 – Елементний склад зразка до і після випробування

Елемент	Серія	До випробування			Після випробування		
		Норма. мас. %	Ат.%	Помилка, [%]	Норма. мас. %	Ат.%	Помилка, [%]
Cr	K	8,89	9,49	0,71	5,18	5,46	0,33
Mn	K	1,41	1,42	0,41	0,67	0,67	0,23
Fe	K	89,70	89,09	5,47	91,42	89,74	4,61
Si	K	-	-	-	1,86	3,63	0,17
Mo	L	-	-	-	0,87	0,50	0,23

Невелика кількість Mn зменшилася або не виявляється. Після дослідження в розширнику виявлено присутність невеликих кількостей нових елементів, не виявлених раніше: V, Si, Mo, ознак специфічного розчинення не спостерігається. Різницю в вмісті хімічних елементів на поверхні зразків до і після витримки в агресивному середовищі можна пояснити тим, що до експерименту на поверхні лопатки були оксиди, що утворилися в процесі термічної обробки.

На межі розділу «рідина-пар» спостерігається більш інтенсивна зміна кольору, рівномірне відкладення продуктів корозії при цій роздільній здатності чітко проглядається (рис. 3.5).



x100

а б

Рисунок 3.5 – Зразок: а – перед випробуванням на витримку до впливу корозійного середовища;

б – після випробування

Результати зміни маси зразка новедено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри корозії зразка

Зразок	E_{korr}	j_{korr}	β_a	β_k	Швидкість корозії
	mV	A cm^{-2}	mV	mV	мкм/рік
1	-255	$3{,}5\text{-}10^{-8}$	300	180	0,4

Можна констатувати, що шар оксиду хрому на поверхні пасивує, захищає метал проти корозії. Потенціал корозії E_{korr} є відносно високим, а щільність струму j_{korr} корозії дуже низька.

Припускаючи рівномірне розчинення заліза, щільність струму корозії відповідає швидкості корозії приблизно 0,4 мкм в рік.

3.2 Дослідження корозійної стійкості шару, зміцненого електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш

Для дослідження вирізаний зразок з лопатки 5 ступеню ротора низького тиску. Вхідна кромка лопатки для дослідження зміцнена електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш. Зовнішній вигляд зразка представлений на рис. 3.6. Ширина зміцненої зони становить 32-35 мм.

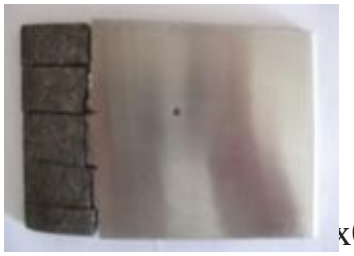
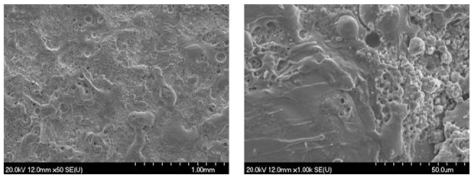

x0,3

Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд зразка лопатки після ЕІЛ

Методика випробування аналогічна для всіх зразків лопаток.

Зображення SEM зразка до впливу корозійного середовища показані на рис. 3.7. На рисунку показано два різних збільшення з двох різних місць, на

поверхні зразка лопатки, зміцненого ЕІЛ сталлю 15Х11МФ-Ш.



а - х50 б - х1000

Рисунок 3.7 – зображення зразка в положенні до впливу корозійного середовища:

Видно, що ця поверхня також неоднорідна, що характерно при електроіскровій обробці поверхні.

Визначено спектр XDR поверхні зразка до випробування, він показаний на рис. 3.8.

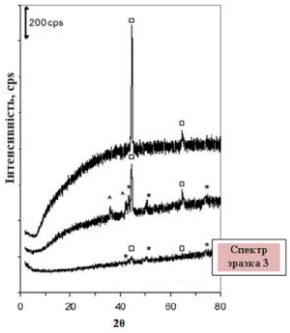


Рисунок 3.8 – Рентгенівські дифрактограми зразків.

Спектр зразка 3. Рефлексії, які можуть бути віднесені до трьох ідентифікованих фаз: □ – (ферит), * (аустеніт)

Крім стабільної феритової форми заліза, виявлена також аустенітна форма. Аустенітна форма утворилася в результаті локального розплавлення електрода зміцнення зі сталі 15Х11МФ-Ш при електроіскровий обробці .

Мінімальні кількості кальцію, кремнію, сірки і азоту можуть бути виявлені в цьому зразку на основі зображень з високою роздільною здатністю. Єдина різниця в порівнянні з попередніми моделями полягає в наявності домішок свинцю в поверхневих шарах досліджуваної ділянки. З протестованих зразків ця область є найбільшою, з вмістом понад 70 % за вагою вуглецю і

навіть при 20-хвилинному травленні Ar + концентрація практично не зменшується. Цікаво, однак, що, хоча вуглець є піком інтенсивності спектрів XP, спектри ISS, що представляють склад самого зовнішнього атомного шару, або не присутні, або в інших випадках виявляються з невеликою інтенсивністю. Аналіз хімічних елементів по глибині зразка показаний на рис. 3.9, 3.10.

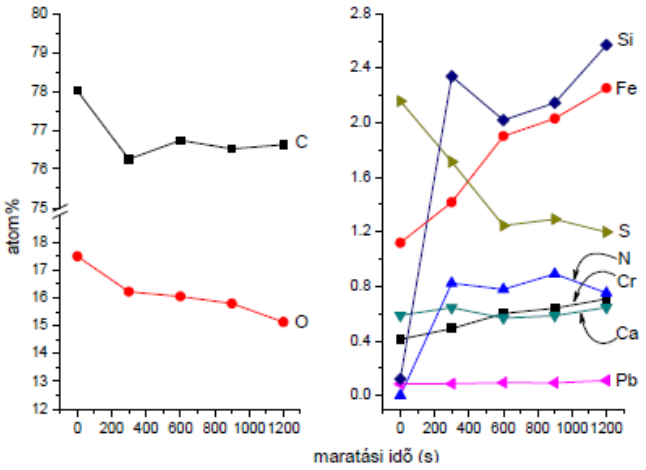


Рисунок 3.9 – Аналіз хімічних елементів по глибині зразка, отриманий при бомбардуванні іонами Ar + 2 keV

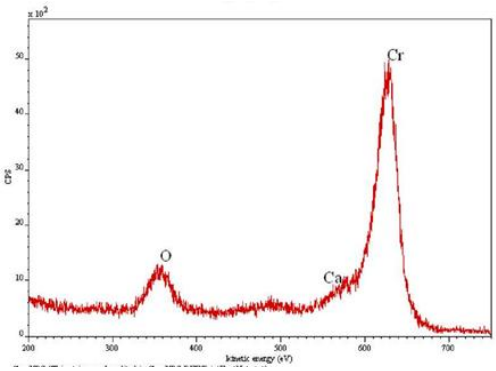


Рисунок 3.10 – Спектр сигналу зразка, іони ISS 800 еВ He^+, характеристика записна без травлення

Результат EDS -аналізу зразка показаний в табл. 3.10 та 3.11.

Абсолютні відсотки інгредієнтів не є точними (вони не містять всіх елементів), але їх пропорція інформативний.

Таблиця 3.10 – Елементний склад зразка в положенні 1

Елемент	Серія	Норма. мас. %	Ат.%	Помилка, [%]
Si	K	2,67	5,09	0,26
V	K	1,19	1,25	0,31
Cr	K	20,09	20,69	1,29
V	K	3,49	3,40	0,58
Fe	K	72,55	69,56	4,47

Таблиця 3.11 – Елементний склад зразка в положенні 2

Елемент	Серія	Норма. мас. %	Ат.%	Помилка, [%]
Si	K	2,62	4,99	0,39
V	K	1,15	1,21	0,41
Cr	K	19,34	19,93	1,50
V	K	3,42	3,33	0,74
Fe	K	73,48	70,53	5,02

При дослідженні елементного складу на поверхні даного зразка, зміцненого ЕІЛ сталлю 15Х11МФ-Ш, виявлено збільшення кількості хрому на 55% по відношенню до зразка, загартованому СВЧ. В результаті масопереносу відбулося локальне насичення мікрометалургійної ванни таким елементом як хром. Безсумнівно, що збільшення вмісту хрому в шарі є позитивним фактором, що впливає на корозійну стійкість зміцненого шару.

Виконано дослідження впливу експозиції в корозійному середовищі зразка, зміцненого ЕІЛ сталлю 15Х11МФ.

В таблиці 3.12 показані результати вимірювання зміни маси зразка після тестування при температурі 300 ° С і витримки в середовищі аміаку.

Таблиця 3.12 – Результати зміни маси зразка після 28-денного експозиційного випробування при 300 °С

	$m_{исх.}$, (г)	$m_{после}$ (г)	А ($см^2$)	Δm(мг)	$\Delta m_{отн}$ (ppm)	Δm /А (ppm/ $см^2$)
зразок	11,2569	11,2572	9,01	300	26,65	2,96

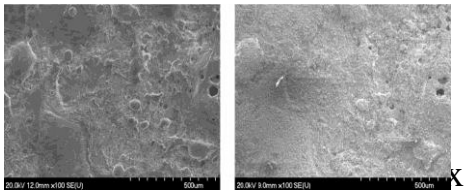
Внаслідок накопичення продукту корозії, збільшення маси спостерігалося після 28 днів експозиції при 300 ° С, але воно було менше, ніж у попередніх зразках. Потрібно відзначити, продукт корозії може бути більш розчинним під час експерименту. Поверхня зразка не є однакова скрізь, тільки одна сторона зміцнена ЕІЛ, а інша сторона є гладкою поверхнею хромової сталі.

На рис. 3.11 показано зображення зразка лопатки до і після випробування.

а б

Рисунок 3.11 – Вигляд зразка, до і після випробування:
а – до випробування, б – після випробування

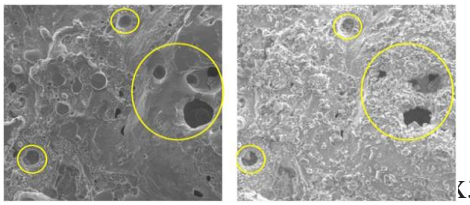
Інтерфейс границі розділу рідина - пара не знімався, тому, що було виявлено рівномірне осадження продуктів корозії на досліджуваній поверхні (рис. 3.12).



а б

Рисунок 3.12 – SEM-зображення зразка:
а – до випробування, б – після випробування

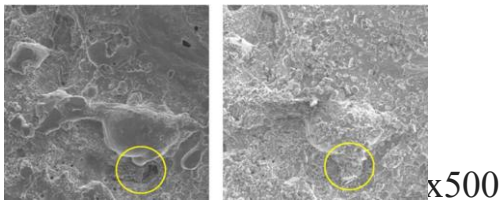
Хоча корозія вплинула на всю поверхню, однак утворився відносно товстий шар корозії зі значними локальними відмінностями. На рис. 3.13 це проілюстровано більш детальніше.



а б

Рисунок 3.13 – SEM-зображення зразка:
а – до випробування, б – після випробування

По краю отворів (рис.3.14) помітне накопичення корозійного продукту: осадження деякої кількості солі, оксиду в отворах і ребрах.



а б

Рисунок 3.14 – SEM зображення зразка
а – до випробування, б – після випробування

Виконано електрохімічні корозійні випробування зразка, зміцненого ЕІЛ сталлю 15Х11МФ.

Діаграма Еванса зразка показана на рис. 3.15.

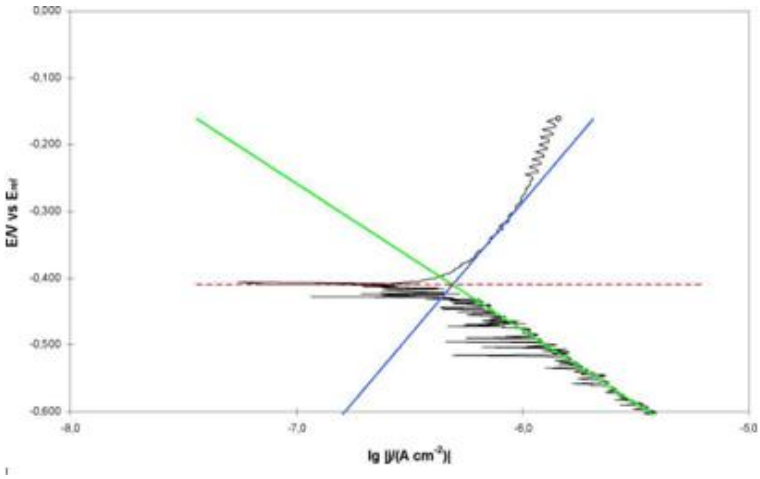


Рисунок 3.15 – Діаграма корозії зразка в розчині NH_3,
pH=9,6 при 50 ° С.

Червона лінія – це потенціал розімкнутого ланцюга, синя лінія – лінія Тафеля анодного процесу (розчинення металу), зелена лінія – лінія Тафеля катодного процесу (розпад води), ступінь нахилу кривих поляризації.

Результати вимірювань параметрів корозії зразка наведені в табл. 3.15.

Таблиця 3.15 – Параметри корозії зразка

	Ekorr	jkorr	βa	βk	Скорость корозії
	mV	A cm^{-2}	mV	mV	мкм/рік
зразок	-410	$4{,}9\text{-}10^{-7}$	400	220	5,6

Потенціал корозії нижче, ніж у попереднього зразка, зміцненого СВЧ, але вище, ніж у зразка, зміцненого ЕІЛ сплавом Т15К6, щільність струму корозії досить висока. Припускаючи рівномірне розчинення заліза, щільність струму корозії буде відповідати приблизно 5,6 г/рік для швидкості корозії.

Результати досліджень експозиції вказують на те, що розчинення металу явно не є однорідним.

Найбільші корозійні пошкодження виявлені вздовж країв кратерів, несплошностей рельєфу, що утворилися в результаті локального оплавлення металу при імпульсному впливі електричного розряду між катодом і анодом.

Кривизна анодної частини діаграми Еванса також свідчить про пасивацію при більш високих густинах струму. Зменшення вмісту легуючих елементів, зокрема хрому, відповідального за корозійну стійкість, в зміцненому шарі є незначним. У паровому середовищі залишковий вміст хрому після впливу агресивного середовища в рідкій фазі залишається на рівні легування стали 15Х11МФ-11-12%, після випробування в паровій фазі значно вище – 19 %. Даний вміст хрому дозволяє забезпечити високу корозійну стійкість в місці локального зміцнення.

Показники корозії зразків в залежності від способу зміцнення наведено

в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Показники корозії зразків в залежності від способу зміцнення

Зразок	Метод зміцнення	Ekorr	jkorr	βa	βk	Швидкість корозії
№		mV	A cm^{-2}	mV	mV	мкм/рік
1	СВЧ	-255	$3{,}5\text{-}10^{-8}$	300	180	0,4
2	ЕІЛ 15Х11МФ	-410	$4{,}9\text{-}10^{-7}$	400	220	5,6

E_{korr} (mV) - потенціал корозії відносно каломельного електрода, що містить 1 M KCl, jkorr (A cm^{-2}) - щільність струму корозії по площі поверхні, A(cm^2) площа поверхні, βa – анодний нахил Тафеля, βk – катодний нахил Тафеля.

За результатами проведених випробувань найменшу швидкість корозії має шар, зміцнений загартуванням струмами високої частоти 0,4 мкм/рік, найбільшу – шар, зміцнений електроіскровим легуванням твердим сплавом Т15К6 12,0 мкм/рік. Швидкість корозії шару, зміцненого електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ в 2,1 менше, ніж у шару, модифікованого сплавом Т15К6 і становить 5,6 мкм/рік.

Важливо при виконанні технологічних операції електроіскрового легування отримувати шари з максимальною щільністю модифікованих легуючих ділянок електродів.

4 Промислові випробування в реальних умовах експлуатації

Процеси ефективності запропонованих способів зміцнення вхідних кромок були досліджені в реальних умовах експлуатації на турбіні К-220-44-АЕС.

В реальних умовах були проведені два промислових експеримента.

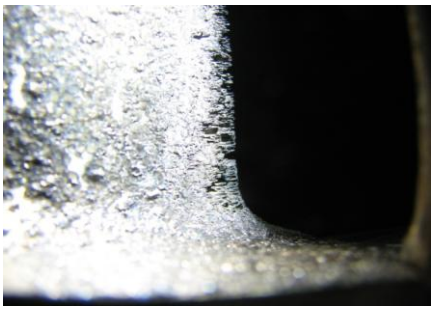
Для проведення промислового експерименту на АТ «Турбоатом» було виготовлено лопатки зі сталі 15Х11МФ і зміцнено їх в такі способи на підприємствах різних фірм:

- електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш по всій довжині лопатки, включаючи радіусний перехід до поличного бандажу, ширина зміцненої зони 30-35 мм;
- комбінованим способом: зміцненням СВЧ по перу лопатки і електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш радіусного переходу по режимам, розробленим і представленим в даній роботі, ширина зміцненої зони 30-35 мм.

Порівняльний аналіз інтенсивності руйнування при експлуатації проводився без демонтажу лопаток з ротора візуальним оглядом.

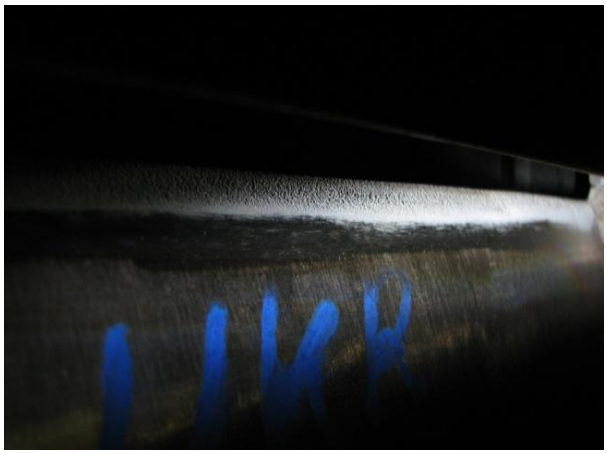
Штатні лопатки виготовлені зі сталі 15Х11МФ-Ш, зміцнення вхідной кромкі електроіскровим легуванням сплавом Т15К6. Фотографії, представлені на рис. 126-130, зняті після п’ятимісячної експлуатації під час останову блоку через проблеми обладнання першого контуру. Фотографії, розташовані зліва (а) показують стан вхідной кромки на тілі лопатки, справа (б) на радіусі переходу до поличного бандажу. Після 5 місяців експлуатації лопатки, зміцнені електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ і комбінованим способом-СВЧ по перу лопатки і ЕІЛ сталлю 15Х11МФ на радіусному переході показали найкращі результати по опору експлуатаційного впливу, в тому числі і корозійно-ерозійного руйнування.

а

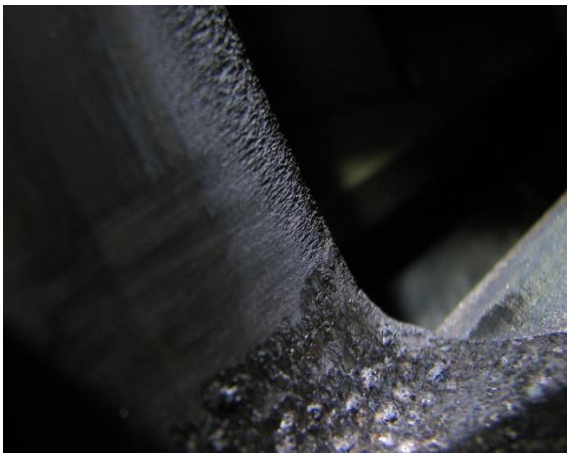


б

Рисунок 3.16 - Результати огляду лопаток після 5 місяців експлуатації: Зміцнення електроіскровим легуванням сплавом Т15К6 (штатні лопатки); а – на вхідній кромці; б – на радіусі переходу до поличного бандажу



а



б

Рисунок 3.17 - Результати огляду лопаток після 5 місяців експлуатації:

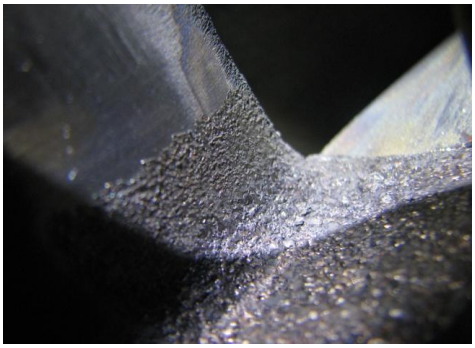
Зміцнення СВЧ по перу лопатки і електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш радіусного переходу;

а – на вхідній кромці; б – на радіусі переходу до поличного бандажу

а

в

б

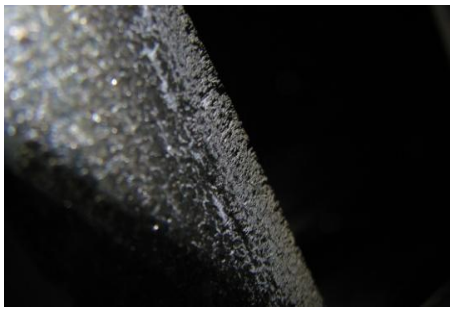


г

Рисунок 3.18 - Результати огляду лопаток після 2 років експлуатації:

Зміцнення СВЧ по перу лопатки і електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш радіусного переходу;

а;в – на вхідній кромці; б;г – на радіусі переходу до поличного бандажу.



а

б

Рисунок 3.19 - Результати огляду лопаток після 2 років експлуатації: Зміцнення електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш

а – на вхідній кромці; б – на радіусі переходу до поличного бандажу.

Незважаючи на короткий термін експлуатації (2 роки) однозначно встановлена перевага запропонованого нами комбінованого способу зміцнення вхідної кромки робочої лопатки зі сталі 15Х11МФ-Ш:зміцнення СВЧ і ЕІЛ сталлю 15Х11МФ-Ш на радіусі.

Висновки

1.Для формування корозійностійкого захисту інтерес представляє матеріал 15Х11МФ-Ш, ідентичний сталі, з якої виготовляються робочі лопатки парових турбін, що дозволяє заощаджувати на придбанні матеріалу електродів для ЕІЛ.

2. Результати експлуатації лопаток, зміцнених сталлю 15Х11МФ-Ш електроіскровим способом на турбіні ДО-220-44 у плині 2- років показали, що корозійне зношування в районі радіуса полочного бандажа менше, чим при зміцненні сплавом Т15 ДО6.

3. На основі проведених досліджень впроваджено застосовуваного зміцнюючого електроду зі сталі 15Х11МФ-Ш для захисту від корозії вхідних кромок робочих лопаток парових турбін.

7.Робота впроваджена на ПАТ «Турбоатом» з економічним ефектом 58 тис. грн.

Перелік посилань

1.Суботін В.Г., Левченко Е.В., Зшивальників В.Л., Парові турбіни ВАТ «Турбоатом» для теплових електростанцій. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, №3 2009 р.

2.А.Л. Шубенко,А.Є. Ковальский Каплеударная ерозія лопаткових апаратів парових турбін. Прогнозування й методи захисту, Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, №7 2017 р.

3.РТМ 108.020.15-86. Метали для турбін і теплообмінного встаткування атомних електростанцій.

4.Біляків А.В., Шапин В.І., Горбачов А.Н Практика формування електроіскрових покриттів для упрчнения й відновлення лопаткового апарата проточної частини парових турбін теплових і атомних електростанцій, «Вісник ИГЭУ», Випуск 4, 2008 р.