

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

**ГРІНЧЕНКО ОЛЕНА ДМИТРІВНА**

УДК 69.017.16:620.18

**МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ  
ЛОПАТОК ПАРОВИХ ТУРБІН**

05.02.01 - матеріалознавство

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро - 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Харківський національний автомобільно-дорожній університет» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Глушкова Діана Борисівна,**  
Державний вищий навчальний заклад «Харківський національний автомобільно-дорожній університет»,  
професор кафедри технології металів та матеріалознавства.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Бабаченко Олександр Іванович,** Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, директор;

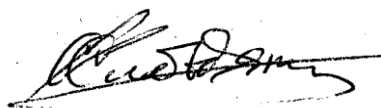
доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Костін Валерій Анатолійович,** Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів.

Захист відбудеться « 25 » березня 2021 р. о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.085.02 при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, та на сайті академії <http://pgasa.dp.ua/dissertation/>.

Автореферат розіслано « 24 » лютого 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
д.т.н., професор



Слободянюк С. О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Неухильне зростання потужності енергетичного обладнання визначає підвищення експлуатаційних параметрів (навантажень, тиску, швидкості, температури), що посилює зношування елементів його складових. Витрати на заміну зношених і малонадійних елементів не тільки неминучі, але і такі великі, що проблема підвищення ресурсу та надійності елементів енергетичного обладнання є актуальною.

У комплексі питань, що визначають надійність та економічність роботи турбін теплових і атомних електростанцій, велике значення має надійність лопаткового апарату - одного з дорогих елементів парових турбін, що найбільш часто пошкоджуються. Особливо гостро ця проблема стоїть для робочих лопаток останніх ступенів циліндрів низького тиску. Під час роботи вони піддаються впливу різних чинників: високих температур, корозії, ерозії, а також статичних, динамічних і температурних напружень. Ерозійний знос лопаток багато в чому визначає ресурс їх роботи.

Багаторічна робота парових турбін різних типів виявила ряд серйозних проблем, пов'язаних з негативним впливом постійно діючих експлуатаційних факторів. До цих факторів, зокрема, належать знос і пошкодження елементів проточної частини турбін, в тому числі краплеударний ерозійний знос робочих лопаток в зоні вологої пари. Ця проблема, незважаючи на те, що застосовуються різноманітні протиерозійні заходи, не вирішена до цього часу. Існує великий досвід створення різних активних і пасивних способів протиерозійного захисту, накопичений до теперішнього часу в усьому світі, але, як і раніше, спостерігаються випадки пошкодження робочих лопаток останніх ступенів парових турбін, що обумовлені виникненням у проточній частині ерозійно-небезпечної крапельної вологи.

Обґрунтування вибору теми дослідження та її доцільність обумовлені тим, що є необхідність удосконалення застосовуваних раніше і в розробці нових методів підвищення довговічності роботи лопаток парових турбін за рахунок впровадження нових способів зміцнення лопаток.

Одним з перспективних напрямків підвищення довговічності лопаток за рахунок зменшення ерозійного зносу є застосування технології зміцнення струмами високої частоти в комбінуванні з електроіскровим легуванням новими матеріалами. Такий спосіб зміцнення забезпечує надійний захист від впливу краплеударної ерозії вхідних кромки лопаток, включаючи ділянку радіусного переходу до бандажу, яка недоступна для загартування струмами високої частоти.

Вирішення цього важливого наукового і народногосподарського завдання потребує наукових основ підвищення довговічності робочих лопаток парових турбін, що зумовило вибір теми, актуальність наукового дослідження з урахуванням його теоретичної і практичної значущості, формулювання мети, наукової новизни і завдань дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Матеріал дисертаційної роботи пов'язаний з участю її автора в роботі над контрактом на постачання лопаток турбін АТ «Турбоатом» для АЕС «ПАКШ». Дисертацію

виконано на кафедрі технології металів та матеріалознавства Харківського національного автомобільно-дорожнього університету відповідно до:

- Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 р. №2623-III;
- контракту №15-81529-348:450247639 на постачання лопаток турбін АТ «Турбоатом» для АЕС «ПАКШ».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення довговічності лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш за рахунок впровадження комплексного зміцнення вхідних кромки лопаток для захисту від ерозійно-корозійного руйнування на основі управління параметрами структури і функціональних властивостей.

Досягнення мети дисертаційного дослідження зумовило необхідність вирішення таких основних задач:

- проаналізувати сучасний стан проблеми руйнування і зносу робочих лопаток парових турбін, що працюють в пароводяному середовищі, а також застосовувані способи підвищення їх довговічності;
- проаналізувати вплив різних способів об'ємної термічної обробки на механічні властивості і структурний стан лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш; визначити оптимальний режим, який забезпечує надійну експлуатацію лопаток;
- сформулювати методологічний підхід для дослідження, що дозволить визначити доцільність застосування пропонованих способів зміцнення, матеріалів і способів їх нанесення на основі експериментальних і теоретичних досліджень;
- науково обґрунтувати та експериментально підтвердити ефективність зміцнення поверхні вхідних кромки робочих лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш електроіскровим легуванням цієї ж сталлю;
- науково обґрунтувати та експериментально підтвердити ефективність зміцнення вхідних кромки робочих лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш комбінованим методом: загартуванням струмами високої частоти та електроіскровим легуванням однойменною сталлю 15X11МФ-Ш;
- розробити та впровадити комбінований спосіб зміцнення вхідних кромки робочих лопаток, включаючи зону радіусного переходу до полиці бандажу.

**Об'єкт дослідження** - процес зміцнення вхідної кромки лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш комбінованим способом: загартуванням струмами високої частоти та електроіскровим легуванням однойменною сталлю 15X11МФ-Ш.

**Предмет дослідження** - закономірності формування структури і властивостей поверхневих зміцнених шарів лопаток парових турбін.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети і вирішення зазначених задач було використано систему загальнонаукових методів і прийомів. Методологічною основою дисертації є об'єднання теоретичних закономірностей та експериментальних результатів. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях теорії матеріалознавства про структурний і фазовий склад матеріалів, перетвореннях при нагріванні та охолодженні, теорії корозії. Оцінювання властивостей матеріалів виконували з використанням стандартних методів механічних досліджень (мікротвердомер ПМТ-3, Nano Indenter G200), металографічного (оптичні мікроскопи ММО-1600, МІМ-8),

рентгеноструктурного (дифрактометр PHILIPS PW3710), мікрорентгеноспектрального аналізів (електронний скануючий мікроскоп PHILIPS XL 30 ESEM), методів електронної мікроскопії (електронний мікроскоп JSM 7001F), визначенням корозійної стійкості (Voltalab 40), визначення ерозійної стійкості методом ультразвукового диспергування (Hielscher УИП-1000).

Лабораторні випробовування виконано з використанням методик, що відповідають державним стандартам України та стандартам ISO.

Промислові випробування робочих лопаток зі зміцненими вхідними кромками за запропонованим способом проводилися спільно з АТ «Турбоатом» на АЕС «ПАКШ» в Республіці Угорщина.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

— вперше встановлено, що поєднання методів поверхневого зміцнення - загартування струмами високої частоти та електроіскрове легування сталлю 15X11МФ-Ш, дозволило підвищити твердість кромки лопатки зі сталі 15X11МФ-Ш в 2,2-3,0 рази до 5500-7000 МПа та підвищити опір ерозійно-корозійному руйнуванню за рахунок формування в поверхневому шарі структури легованого мартенситу, залишкового аустеніту та складних карбідів  $Cr_3C_2$  та  $Cr_7C_3$ ;

— вперше встановлено, що використання корозійностійкої сталі 15X11МФ-Ш, яка ідентична основному матеріалу лопатки, для зміцнення методом електроіскрового легування вхідної кромки робочої лопатки парової турбіни дозволило підвищити стійкість до ерозійного руйнування на 72% за рахунок збільшення концентрації хрому до 44%;

— удосконалено та апробовано метод порівняльної оцінки ефективності зміцнюючих технологій підвищення довговічності робочих лопаток парових турбін;

— отримав подальший розвиток метод оцінки корозійної стійкості захисних зміцнених шарів, вперше отримано залежності параметрів корозії від структурно-фазового стану зміцнених шарів лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

— розроблено технологію підвищення довговічності лопаток парових турбін за рахунок застосування комбінованого способу зміцнення шляхом поєднання у одному технологічному процесі загартування струмами високої частоти та електроіскрове легування;

— розроблено методику зміцнення вхідної кромки лопатки останнього ступеня низького тиску ротора парової турбіни. Авторські права на результати дисертаційної роботи підтверджені свідоцтвом про реєстрацію авторського права (патент України № 116611);

— запропоновано режим об'ємної термічної обробки сталі 15X11МФ-Ш що складається з загартування з температур 990-1010 °С з охолодженням в оливі та відпуску при 690-710°С, або калібрування, поєднане з загартуванням з температур 1050-1070 °С, середа охолодження - олива, відпуск 680-710 °С, 3 години, охолодження на повітрі;

— визначено оптимальні параметри роботи установці зміцнення струмом високої частоти ВЧИ-63/044: робоча частота струму – 440 кГц; анодний струм генераторних ламп – 2,5 - 3,5 А; напруга за індикатором – 2,5 - 4,5 кВ;

— визначено оптимальний режим роботи при електроіскровому легуванні на

установці моделі «ЕІЛ-8А»: амплітудне значення струму імпульсу  $175 \pm 10$  А; енергія імпульсу 3,15 Дж; тривалість імпульсу 1000 мкс; частота 600 Гц;

— зміцнення запропонованим в дисертаційній роботі способом впроваджено спільно з АТ «Турбоатом» на лопатках турбін К 220-44-2 АЕС «ПАКШ», Республіка Угорщина, що підтверджується актом впровадження;

— теоретичні та практичні розробки, запропоновані в дисертації, використовуються у навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету при викладанні дисциплін, при виконанні випускних кваліфікаційних робіт магістрів.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є самостійним, цілісним і завершеним дослідженням. Теоретичні і практичні розробки, висновки та рекомендації, які наведено в роботі і виносяться на захист, отримані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві [1-3, 5, 7-9], у дисертації використано лише ті положення, які є результатом особистих наукових пошуків. У наукових роботах, опублікованих в співавторстві, здобувачу належать:

— методика оцінювання впливу режимів зміцнення і параметрів зміцнених шарів та їх властивості [2, 6, 7, 9];

— розробка способу зміцнення вхідних кромek лопаток [3-5];

— аналіз отриманих даних і результатів досліджень [6, 9];

— впровадження результатів дослідження у виробництво [1, 14].

**Апробація результатів дисертації.** Дисертацію обговорено на засіданні кафедри матеріалознавства Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Основні положення і результати дослідження та розробленої експериментальної методики доповідалися й обговорювалися на таких міжнародних конференціях: «Сучасні проблеми і технології забезпечення якості конструкційних матеріалів» (м. Харків, 22-23 вересня 2016 р.); «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2017» (м. Люблін, Польща, УТ НКТД, 24-27 жовтня 2017 р.); «Сучасне матеріалознавство: ідеї, рішення, результати» (м. Харків, 26-27 вересня 2019 р.); «Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів» (м. Харків, 24-25 вересня 2020 р.).

**Публікації.** Основні положення і висновки дисертаційної роботи викладено у 14 наукових працях, серед яких 6 статей – у наукових фахових виданнях, 3 статті – в зарубіжних наукових виданнях (що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus) та 4 тезах доповідей на науково-практичних конференціях і отримано 1 патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 215 сторінок, у тому числі основний текст займає 165 сторінок. Матеріали дисертації проілюстровано 135 рисунками, 45 таблицями, список використаних джерел налічує 141 найменування на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, наведено загальну характеристику

дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання дослідження, представлено положення, які визначають наукову новизну та практичну значущість роботи, відомості про особистий внесок автора, апробацію, публікації та структуру дисертації.

**Перший розділ** дисертації присвячений аналізу стану проблеми підвищення довговічності лопаток парових турбін. Розглянуто умови їх експлуатації, причини виходу з ладу, використовувані методи захисту вхідних кромek лопаток. Цими питаннями займалися вітчизняні та іноземні вчені: Зозуля Н.Ф., Погрібний Н.А., Кириченко О.П., Беляков А.В., Буханан Е., Еєбара Р., Одохіра Т. та ін.

Аналіз експлуатації робочих лопаток показав, що робочі лопатки циліндрів низького тиску (більшою мірою останні ступені) схильні до ерозійного зносу. Знос вхідних кромek пов'язаний з наявністю вологи в робочому тілі циліндра і часто ускладнюється зниженою (за умовами роботи котла) температурою свіжої пари при збереженні розрахункового початкового тиску. Ерозія вихідних кромek пов'язана з підсмоктуванням вологи з конденсатора або відборів і розвивається, як правило, від кореня лопатки. Ерозійні пошкодження, особливо у вигляді наскрізних промивів, є концентраторами напружень і можуть призвести до втомного руйнування робочих лопаток. При значних втратах металу внаслідок ерозії знижуються міцнісні характеристики, порушується вібраційна відбудова лопаток і погіршуються аеродинамічні показники проточної частини.

Одним з перспективних й ефективних шляхів зниження ерозійного зношування поверхонь лопаток турбін вологопарових ступенів є нанесення захисних покриттів з матеріалів підвищеної ерозійної стійкості або поверхневого зміцнення самого матеріалу. Незважаючи на збільшення капітальних вкладень при створенні подібного захисту, вони швидко окупаються.

Аналіз способів захисту вхідних кромek робочих лопаток турбін від шкідливого впливу краплеударної ерозії показав, що при безлічі розроблених способів захисту стабільно надійного результату отримати не вдалося, тому питання розробки методу захисту від ерозії лопаток, що працюють у вологопаровому режимі, залишається актуальним.

Проаналізовано сучасні способи зміцнення та обґрунтовано основний напрямок досліджень. Розглянуто умови експлуатації, причини виходу з ладу і використовувані методи підвищення ерозійної стійкості лопаток парових турбін.

Встановлено, що робочі лопатки парових турбін передчасно виходять з ладу в результаті впливу ударів крапель, впливу агресивного корозійного середовища, механічного напруження, втомного руйнування. Вивчення досвіду експлуатації лопаткового апарату показало, що при однаковому конструктивному виконанні лопаток великий вплив має водно-хімічний баланс, корозійне середовище, індивідуальне для кожної ТЕС, АЕС. Визначено, що встановлення теоретичних основ формування структури і властивостей захисних шарів деталей лопаток парових турбін є важливим і актуальним завданням. Основний напрямок дослідження обрано на основі даних і наявного досвіду експлуатації турбін. На підставі комплексного аналізу літературних джерел підтверджено актуальність обраної теми та сформульовано мету та основні задачі дослідження.

**У другому розділі** обґрунтовано вибір матеріалу й використаних методів,

методик та устаткування для проведення досліджень. Розроблено та апробовано методику порівняльної оцінки ефективності зміцнюючих технологій підвищення довговічності робочих лопаток парових турбін.

Дослідження проводилося на зразках від заготовок лопаток і лопатках зі сталі 15X11МФ-Ш, виготовлених методом штампування. Щоб забезпечити чистоту за неметалевими включеннями і гарантувати відсутність волосовин, що є концентраторами напружень, найбільш відповідальні деталі, якими є робочі лопатки, виготовляють зі сталі 15X11МФ-Ш після електрошлакового переплаву. Хімічний склад сталі 15X11МФ-Ш ГОСТ 5632-72 наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваної сталі 15X11МФ-Ш

	Вміст хімічних елементів, %								
	C	Cr	Ni	Mo	V	Si	Mn	S	P
Фактичний склад зразка 1	0,14	10,58	0,26	0,63	0,3	0,18	0,33	0,013	0,022
Фактичний склад зразка 2	0,19	10,86	0,2	0,62	0,33	0,23	0,43	0,009	0,022
Вимоги ГОСТ 5632-72	0,12-0,19	10,0-11,5	–	0,6-0,8	0,25-0,4	≤ 0,5	≤ 0,7	≤ 0,025	≤ 0,03

При проведенні експериментів для поверхневого зміцнення методом ЕІЛ використовувалися корозійно стійка високолегована сталь 15X11МФ-Ш і сплав твердий спечений Т15К6. Сплав Т15К6 складається з двох типів карбідів титано-вольфрамової групи (79% WC та 15% TiC) і кобальту (6% Co).

Для виконання операцій зміцнення поверхні лопаток методом загартування струмами високої частоти використовувалася установка ВЧІ-63-044. Для зміцнення методом електроіскрового легування використовувалася установка «ЕІЛ-8А».

У третьому розділі представлені результати експериментів по зміцненню заготовок лопаток об'ємною термічною обробкою, зміцненню вхідних кромок робочих лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш комбінованим методом: загартуванням струмами високої частоти та електроіскровим легуванням однойменною сталлю 15X11МФ-Ш.

По перу лопатки вхідна кромка лопатки зміцнювалась струмами високої частоти, зона радіусного переходу до полиці бандажу, яка не може бути зміцнена струмами високої частоти через особливості індуктора, зміцнена електроіскровим легуванням. Зони зміцнення лопатки показані на рисунку 1.

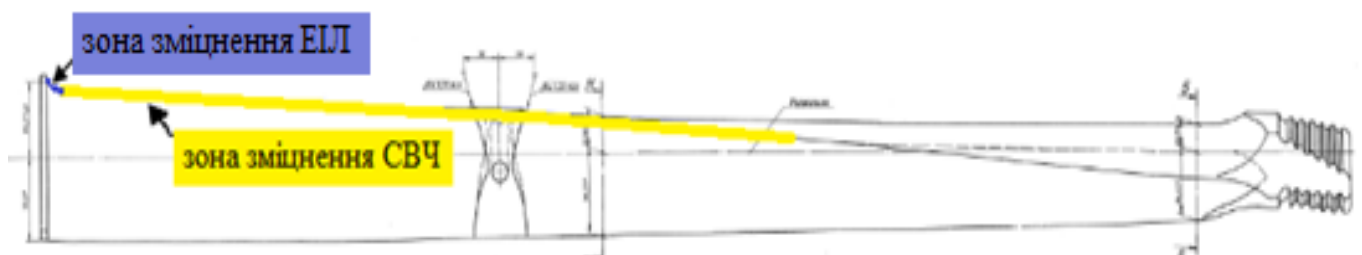


Рисунок 1 – Зони зміцнення вхідної кромки лопатки



Надійність роботи лопаток останніх ступенів роторів низького тиску парових турбін, що працюють в середовищі вологого пару, залежить від комплексу властивостей матеріалу лопаток, отриманих в результаті технологічного процесу об'ємної термічної обробки і поверхневого зміцнення вхідних кромek лопаток для захисту від агресивного впливу краплеударної ерозії і корозійного середовища.

На першому етапі роботи досліджено вплив режимів об'ємної термообробки на процеси структуроутворення та механічні властивості сталі 15X11MФ-Ш.

Кінетика розпаду аустеніту сталі 15X11MФ-Ш при безупинному охолодженні визначена дилатометричним методом. Термокінетичні діаграми наведені на рис. 2.

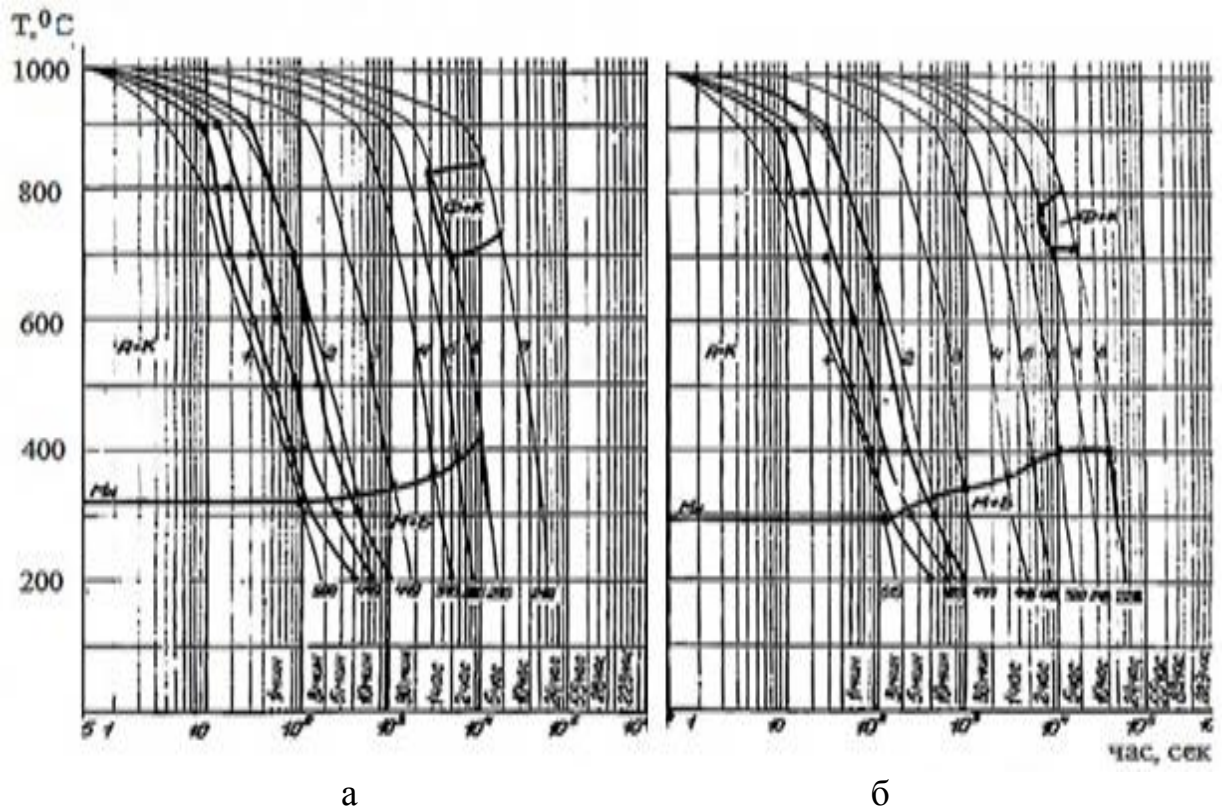


Рисунок 2 – Термокінетична діаграма розпаду переохолодженого аустеніту для сталі 15X11MФ-Ш: а – 0,14 % С; б – 0,19 % С

Згідно з отриманими даними точки  $A_{C1}$  (870 °С) та  $A_{C3}$  (915 °С) мають більш високі значення, ніж вказані у довідковій літературі. При меншому вмісті вуглецю у сталі в межах однієї марки відбувається зміщення критичних точок в область більш високих температур.

На підставі визначення механічних властивостей ( $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $\Psi$ , КСУ, визначення твердості) встановлені параметри об'ємної термічної обробки для отримання необхідних властивостей: гартування з температур 990-1010 °С з охолодженням в оливі та відпуску при 690-710°С, або калібрування, поєднане з гартуванням з температур 1050-1070 °С, середя охолодження - олива, відпуск 680-710 С, 3 години, охолодження на повітрі.

Така термічна обробка забезпечує високі стабільні механічні властивості сталі (табл. 2).

Таблиця 2 – Механічні властивості лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш

Механічні властивості сталі 15X11МФ-Ш					
$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_B$ МПа	$\delta_5$ %	$\psi$ %	КСУ Дж/см <sup>2</sup>	НВ
736-767	850-963	15,0-18,0	54-65	60-74	255-285

Визначено особливості формування мікроструктури під час загартування і відпуску після об'ємної термообробки. Встановлено, що мікроструктура матеріалу лопаток після зміцнення за обраними режимами являє собою сорбіт з орієнтацією карбідів за мартенситними площинами (рис. 3).

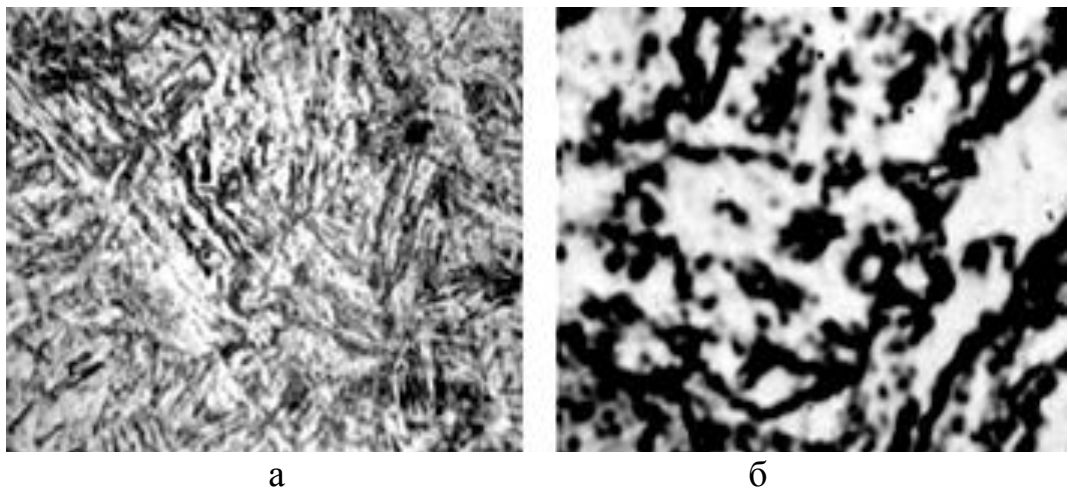


Рисунок 3 – Мікроструктура металу лопатки після об'ємної термічної обробки:  
а – x100; б – x1000

У роботі було запропоновано поєднати два методи зміцнення вхідної кромки лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш – загартування струмами високої частоти та електроіскрове легування сталлю 15X11МФ-Ш, яке проводять послідовно в єдиному технологічному циклі для підвищення експлуатаційних властивостей (міцності, твердості, опору ерозійно-корозійному руйнуванню).

Поверхнєве загартування з нагріванням струмами високої частоти належить до найбільш поширених та ефективних способів зміцнення деталей. Було виконано експерименти зі зміцнення вхідної кромки робочої лопатки як зони, що найбільш схильна до ерозійного руйнування, підібрано режими загартування і відпуску для зняття напружень, визначено оптимальну глибину загартованого шару і його твердість як критерії показників якості.

Зростання швидкості нагрівання під час загартування струмами високої частоти призводить до зміщення критичних точок у бік збільшення. Мікроструктура поверхні кромки лопатки після зміцнення струмами високої частоти (рис. 4а) складається з безструктурного мартенситу або безголчастого мартенситу і карбідів  $Cr_3C_2$  і  $Cr_7C_3$ . Найбільша довжина голок мартенситу становить 0,2мкм. Глибина зміцнюючого шару становить по вхідній кромці 0,5–1,0 мм, а по боковій поверхні в

залежності від перетину профілю лопатки 0,5–3,0 мм.

На підставі проведених досліджень встановлено, що поверхневе загартування лопаток слід проводити за режимом, що забезпечує структуру сорбіту, тобто при температурі загартування 1100–1150 °С. За результатами проведених досліджень був обраний оптимальний режим термообробки: відпуск для зняття напружень при температурі 330 °С тривалістю три години. Це забезпечує твердість кромки лопатки на рівні 35-52 HRC і стійкість від ерозійного руйнування в процесі експлуатації.

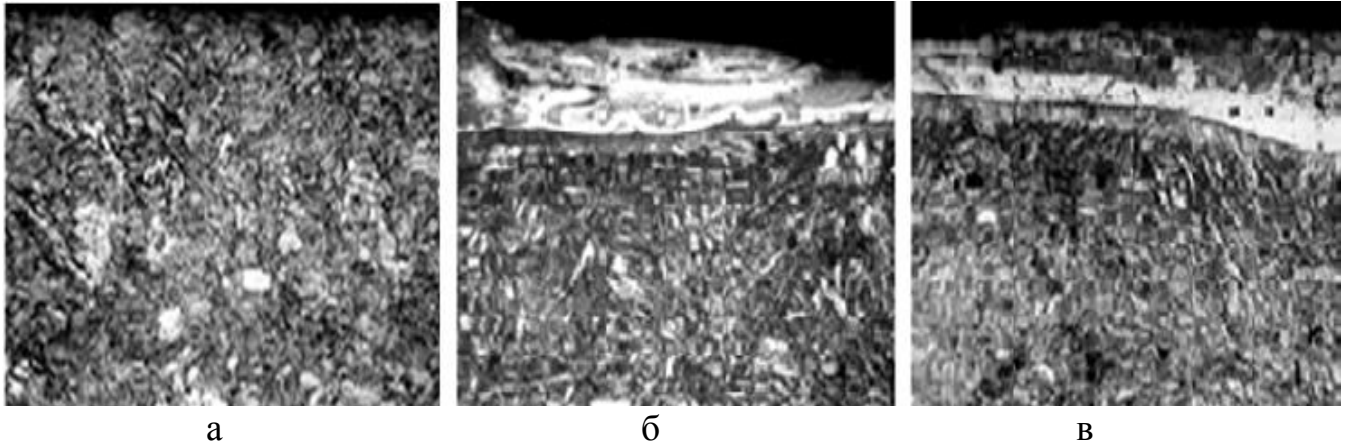


Рисунок 4 – Мікроструктура кромки лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш після загартування: а – загартування токами високої частоти; б – електроіскрове легування сталлю 15X11МФ-Ш; г – комбіноване зміцнення х400

Структурні дослідження зразків для визначення фазового складу виконані методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі Philips PW3710 в випромінюванні  $\text{Cu-K}\alpha$  з використанням зйомок в  $q$ - $2q$ . Зйомки проводилися шляхом  $2q$  сканування при фіксованому куті падіння рентгенівського випромінювання на зразок  $\alpha$ , який становив 2 град. При цьому використовувалися всі наявні відображення, а кут між нормаллю до площин відображення і нормаллю до поверхні зразка для кожного відображення  $(hkl)$  визначався як:  $\psi = \theta^{hkl} - \alpha$ , де  $\theta^{hkl}$  – кут дифракції. Апроксимація точок на графіку проводилася з урахуванням того, що похибка визначення періоду решітки зменшується зі збільшенням кута дифракції:  $\Delta a / a \approx -\text{ctg}\theta (\Delta\theta)$ . Отримані рентгенограми зразків лопаток турбіни в зоні зміцнення струмами високої частоти (рис. 5).

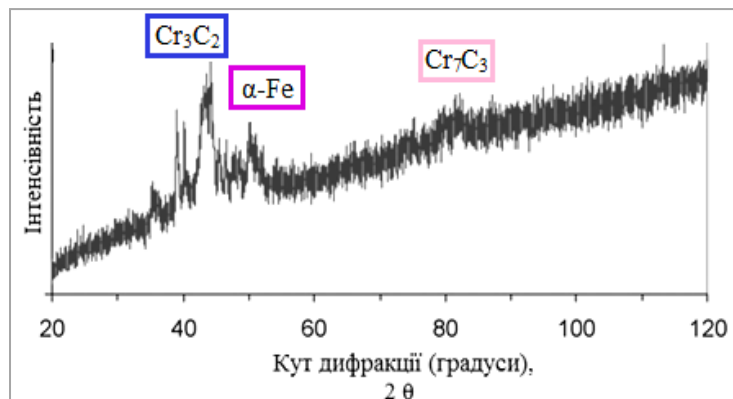


Рисунок 5 – Рентгенівська дифрактограма лопатки в зоні зміцнення СВЧ

Результати рентгенівського фазового аналізу показують, що на дифрактограмі присутні максимуми  $\alpha$  фази Fe, а також незначна кількість карбідів  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  і  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ .

Наявність дрібнодисперсних карбідів  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  забезпечує високу твердість загартованого шару. Це можна пояснити різким збільшенням числа бар'єрних частинок (карбідів) в цієї температурній області.

Підвищена інтенсивність рівня фону вказує на формування квазікристалічної структури в зоні зміцнення.

Формування структурного стану, як і розподіл мікротвердості залежить від декількох факторів, основні з яких: розподіл температури в поверхневій зоні до кінця нагріву, вхідна структура, загартовуваність сталі, умови охолодження. Глибина поверхневого загартованого шару сталі однієї марки буде тим більше, чим більше в сталі вміст вуглецю в рамках однієї марки сталі. Глибина зміцненого шару досліджувалася на поперечних зразках лопаток, вирізаних в трьох перетинах.

Макроструктура та розподіл мікротвердості по 6 перетинах кромки лопаток, зміцнених струмом високої частоти сталі 15X11МФ-Ш наведено на рис. 6.

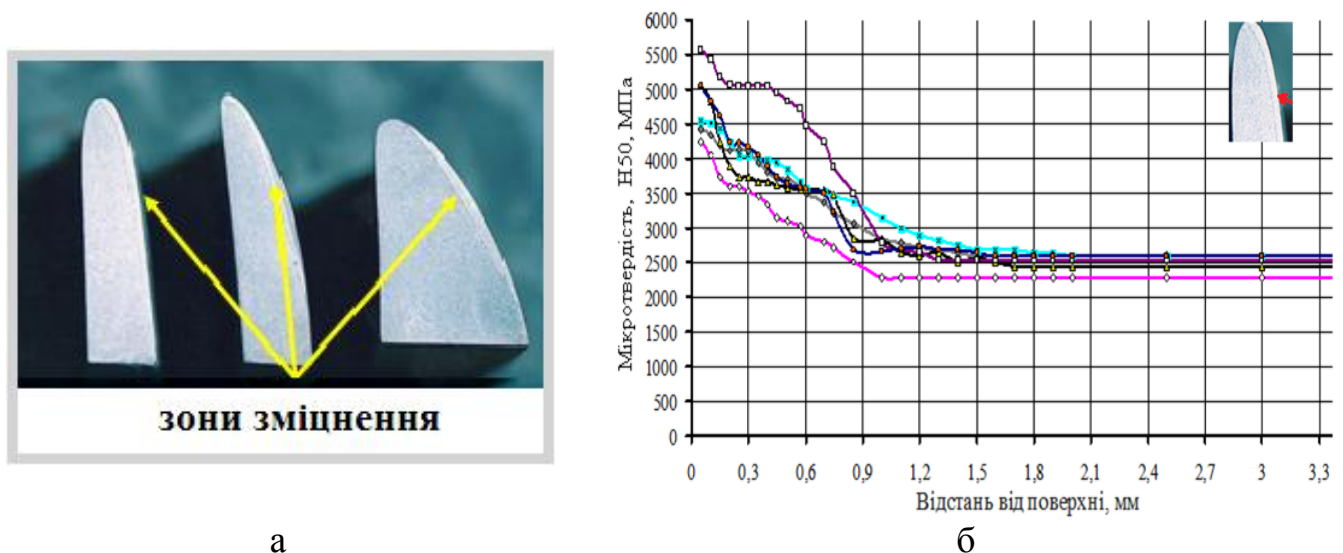


Рисунок 6 – Макроструктура (а) та розподіл мікротвердості по перетинах кромки лопаток(б), зміцнених струмом високої частоти сталі 15X11МФ-Ш

Визначено рівень і розподіл мікротвердості по глибині шару, загартованого струмами високої частоти. Значення мікротвердості на боковій поверхні досліджуваних лопаток становлять  $H_{50}=5560 - 6000$  МПа, на вершині вхідної кромки –  $H_{50} = 4830 - 6200$  МПа.

Визначено рівень і розподіл мікротвердості по глибині шару, загартованого струмами високої частоти. Значення мікротвердості на боковій поверхні досліджуваних лопаток становлять  $H_{50}=5560 - 6000$  МПа, на вершині вхідної кромки –  $H_{50} = 4830 - 6200$  МПа. Згідно з вимогами стандарту підприємства на робочих лопатках глибина шару, який необхідно отримати після гартування СВЧ, по вхідній кромці повинна бути в межах 0,5-1,0 мм, а по боковій поверхні залежно від перетину профілю лопатки від 0,5 до 3,0 мм. Ширина зміцненої зони становить 30-35 мм. Мікроструктура загартованого шару складається з мартенситу відпуску та залишкових карбідів. (рис. 7).

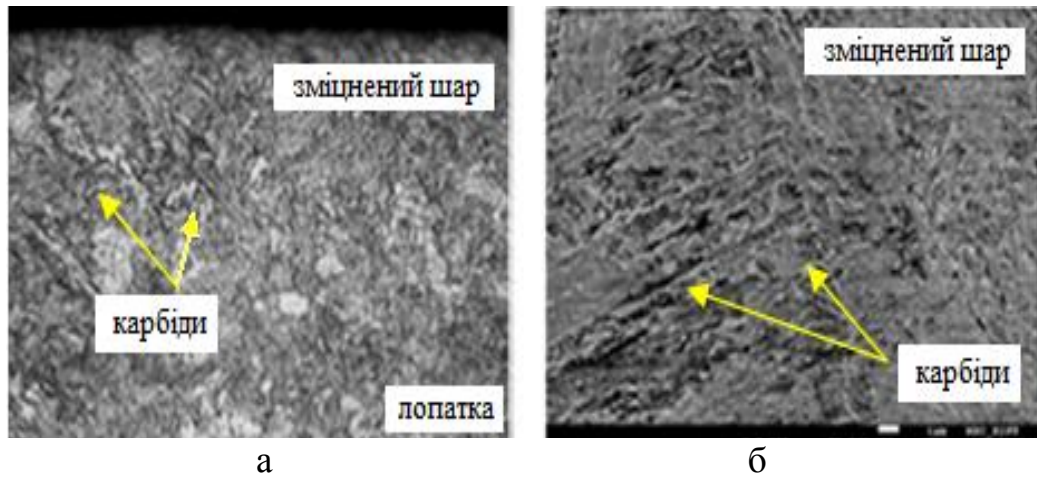


Рисунок 7 – Мікроструктура загартованого шару лопатки  
а – збільшення x500; б – збільшення x5000

Через велику швидкість нагріву і за відсутністю часу витримки при максимальній температурі циклу утворюється дрібне зерно аустеніту з великою протяжністю межі між зернами. Дифузійне перетворення практично відсутнє, в мікрооб'ємах аустеніту формуються кристали мартенситу розміром до 0,2 мкм, що відрізняються за складом.



Рисунок 8 – Розподіл залишкових напружень у зміцненому шарі: 1 – гартування СВЧ, 2 – гартування СВЧ і відпуск 330°С

При зміцненні вхідної кромки робочих лопаток загартуванням СВЧ технічно складно виконати загартування у зоні *R*-переходу до бандажної полицки.

Це пов'язано з особливостями виготовлення індуктора: профіль лопатки в зоні переходу до полицного бандажу повертається на кут близько 90 градусів, тому нами розроблено комбінований спосіб зміцнення вхідної кромки лопатки по всій довжині.

Для цього зону (рис. 9), недоступну для зміцнення струмами високої частоти, вперше було запропоновано зміцнювати методом електроіскрового легування, використовуючи в якості легуючого електрода сталь того ж самого складу, як і сама лопатка - 15X11МФ-Ш.

Проведено дослідження розподілу залишкових напружень у шарі, зміцненому струмами високої частоти (рис.8). Безпосередньо в самому загартованому шарі по всій його глибині діють стискувальні залишкові напруження. На межі зміцненого шару з незагартованим металом залишкові стискувальні напруження переростають у розтягуювальні, які, однак, не носять пікового характеру, а рівномірно поширюються вглиб лопатки. Таким чином, розподіл залишкових напружень по поверхні та глибині лопатки після загартування з нагріванням струмами високої частоти носить сприятливий характер.

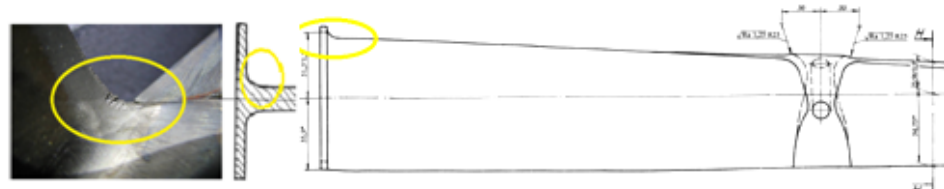


Рисунок 9 – Ділянка лопатки, що не доступна для загартування СВЧ

Сам спосіб зміцнення електроіскровим легування застосовується в машинобудуванні досить давно, у вітчизняному та зарубіжному енергетичному машинобудуванні для зміцнюючого електрода раніше застосовувалися тверді сплави на основі різних карбідів високої твердості (Т15К6, ВК3). Але обмеженням в застосуванні цих сплавів є наявність кобальту, забороненого в обладнанні АЕС першого контуру.

Згідно з літературними даними, є успішний досвід відновлення профілю лопаток, пошкодженого при експлуатації, наплавленням сталі 15Х11МФ, крім того, при виробництві лопаток завжди є залишки металу, які можна використовувати для виготовлення зміцнюючого електрода, тому було прийнято рішення застосувати сталь 15Х11МФ-Ш для зміцнення лопаток. Перевагою сталі 15Х11МФ-Ш перед традиційним сплавом Т15К6, що застосовується при зміцненні лопаток є відсутність кобальту у складі сталі. Сплави з наявністю кобальту заборонено застосовувати в обладнанні АЕС першого контуру.

Роботи зі зміцнення зразків електроіскровим легуванням виконувалися на установці моделі «ЕІЛ-8А». Було випробувано два режими зміцнення № 4 та № 7 зі штатних режимів, доступних для використання. Параметри режимів наведено в таблиці 3. Вплив матеріалу легування, режимів ЕІЛ на якісні параметри покриттів визначався на зразках, виготовлених з робочих лопаток.

Таблиця 3 – Режими роботи установки «ЕІЛ-8А»

Номер режиму	Амплітудне значення струму імпульсу, А	Енергія імпульсу, Дж	Тривалість імпульсу $t_{ім}$ , мкс	Частота, Гц
№ 4	175±10 А	0,39	125	400
№ 7	175±10 А	3,15	1000	600

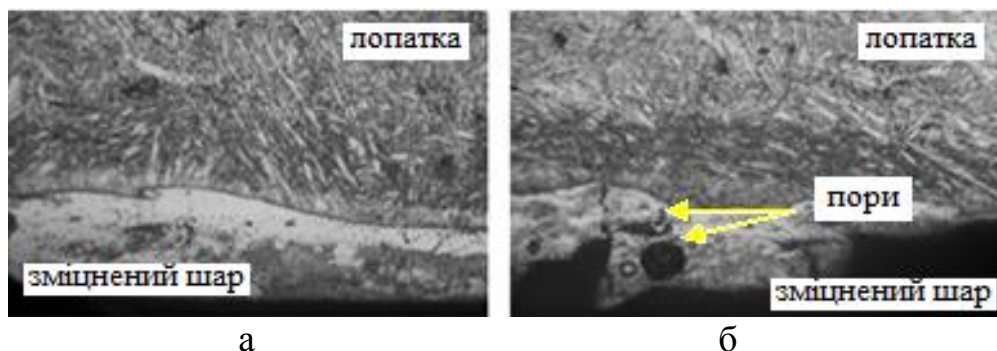


Рисунок 10 – Пори в зміцненому шарі після електроіскрового легування, x100:  
а – режим № 7; б – режим № 4

Аналіз мікроструктури показав наявність дефектів у зоні зміцнення – пор (рис.10). Встановлено, що за режимом № 4 частка пор значно більше ніж за режимом № 7, тобто параметри режиму № 4 не дозволяють отримати якісний зміцнений шар.

Для оцінки якості зчеплення зміцнених шарів з основою було виготовлено зразки і випробувано на вигин. Випробування на вигин витримали, не зруйнувавшись, всі зразки. Випробування адгезії шарів на зразках показали відсутність відшарування. При жорстких навантаженнях, якими є випробування на вигин, шар ЕІЛ показав надійне зчеплення з основним металом.

Визначено розподіл легуючих елементів у зміцненому шарі, виконаному ЕІЛ сталлю 15X11МФ-Ш. Встановлено, що у зміцнених шарах після електроіскрового легування формуються локальні зони із наявністю підвищеного вмісту хрому до 39-44 %, що в 4 рази більше, ніж в основному металі лопатки, марганцю близько 5%, що також значно вище, ніж його вміст у сталі 15X11МФ-Ш.

При аналізі мікроструктури лопаток після електроіскрового легування встановлено, що загальний шар ЕІЛ має дві зони: верхній білий, що практично не піддається травленню, здається однорідним, і нижній перехідний шар зі змінною концентрацією дифузійного характеру (рис. 10). Розмір шару становить 0,3 мм. Рівень мікротвердості складає 6000-7500 МПа. Біля поверхні лопатки мікроструктура шару зміцненого ЕІЛ сталлю 15X11МФ-Ш має дендритну будову (рис.11).

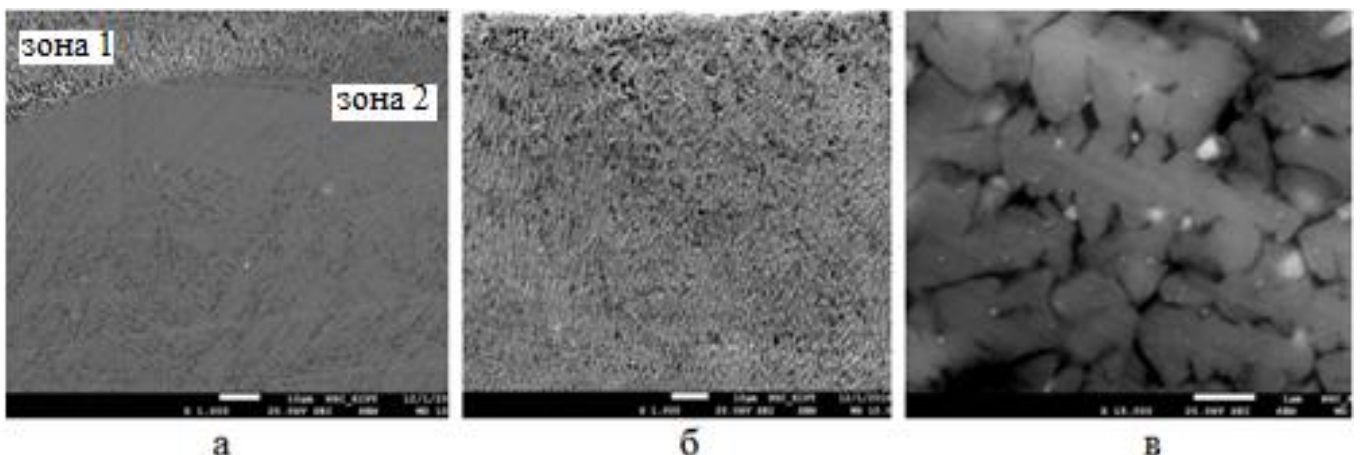


Рисунок 11 – Мікроструктура шару після електроіскрового легування сталлю 15X11МФ-Ш: а, б – x1000; в – дендрити в зміцненому шарі, x15000

Тобто в процесі електроіскрового легування метал нагрівався до рідкого стану, а потім повільно охолоджувався, що і привело до формування дендритної структури шару. В зоні переходу до металу лопатки мікроструктура формується за одним принципом зі структурою тіла лопатки та має голчасту будову, але відрізняється меншою кількістю карбідів, ніж в металі лопатки після об'ємного гартування.

Аналіз мікроструктури шару після електроіскрового легування лопатки (катод) (рис. 10; 11), по глибині можна розділити на 2 зони: зона 1, в якій відбувається перемішування рідких фаз матеріалів електродів, і зона 2, що лежить нижче перемішування, в якій елементи матеріалу анода переносяться в твердій фазі

(дифузійна зона). фізичними процесами, що відрізняються за своєю природою, але є залежними від кількості введеної енергії.

Рентгеноструктурний аналіз характерних зон шару, показав, що зони є неоднорідними за своїм структурно-фазовим складом. Так у зоні 1 встановлено формування тільки фериту  $\alpha$ -Fe, тоді як у зоні 2 формується структура, яка складається з аустеніту – 35 %, фериту – 62 % і в незначній кількості магнетиту  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (~ 3 %). (рис. 12).

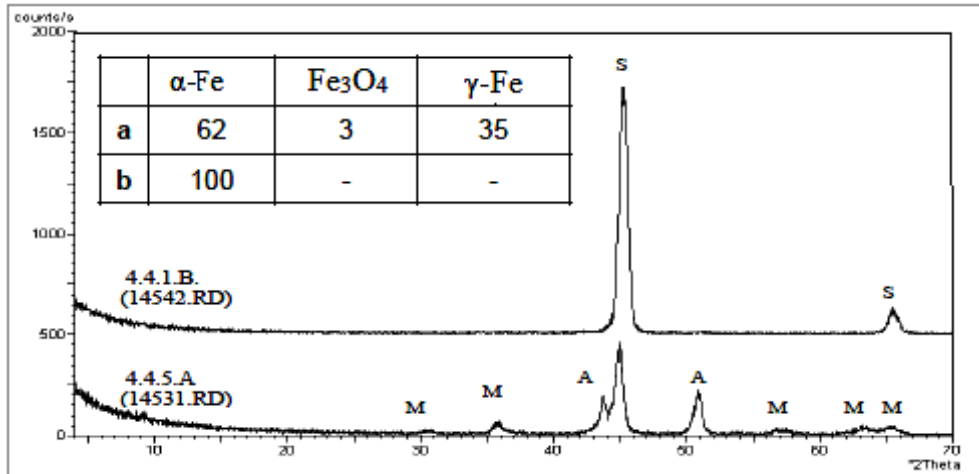


Рисунок 12 – Дифрактограми поверхневого шару зразка, зміцненого ЕІЛ сталлю 15X11МФ-Ш

На наступному етапі роботи було досліджено мікротвердість на частині пера лопатки, зміцненої електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ-Ш за двома варіантами: 1) на лопатці в стані після об'ємної термообробки (без зміцнення СВЧ); 2) на лопатці, що була попередньо зміцнена СВЧ, для імітації перекидання зони зміцнення на пері лопатки. Встановлено, що мікротвердість шару на лопатці, що була попередньо зміцнена СВЧ, на 10% вища, ніж на лопатці без попереднього зміцнення (рис. 13).

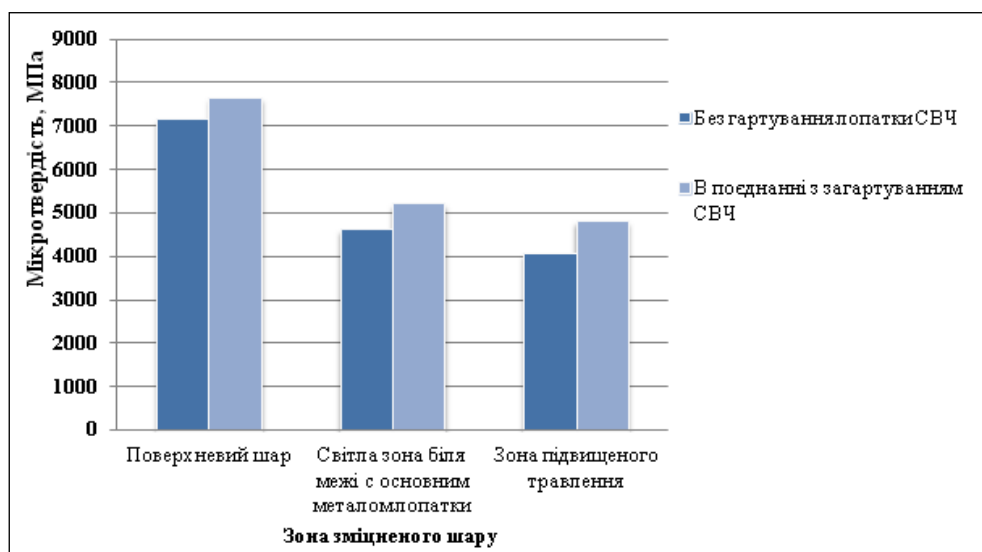


Рисунок 13 – Мікротвердість шару ЕІЛ, зміцненого сталлю 15X11МФ-Ш



Досліджено вплив способів зміцнення на основні механічні властивості сталі 15X11МФ-Ш після об'ємного гартування і відпустку в стані без поверхневого зміцнення шарів після гартування струмами високої частоти, електроіскрового зміцнення сплавом Т15К6 і сталлю 15X11МФ-Ш.

Вплив на поверхню лопатки СВЧ підвищує нанотвердість поверхні лопатки в 1,59 рази, метод ЕІЛ Т15К6 – у 1,32 рази, ЕІЛ 15X11МФ-Ш також у 1,32. Найбільше значення величини Н/Е 0,03 як характеристики здатності матеріалу до зносу отримано при зміцненні СВЧ, у випадку зміцнення ЕІЛ – 0,23, що на 17 % менше.

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню на корозійну стійкість, ерозійну стійкість, промисловим випробуванням в реальних умовах експлуатації вхідних кромок лопаток, які зміцнені різними способами.

Проблема ерозійно-корозійного руйнування лопаток останніх ступенів парових турбін значною мірою обумовлена агресивним впливом корозійного середовища. З метою визначення корозійної дії середовища відібрано проби води на АЕС турбіни К220-44-2. Присутність в пробах води домішок металів свідчить про протікання ерозійних процесів при експлуатації лопаткового апарату турбін.

Встановлено, що процеси корозії лопаток турбін протікають достатньо повільно в робочих умовах при  $+50^{\circ}\text{C}$ , тому для виявлення основних закономірностей ерозійно-корозійного руйнування лопаток та підвищення інтенсивності протікання цих процесів їх досліджували при підвищених температурах до  $+300^{\circ}\text{C}$  у середовищі  $\text{NH}_3$  рН 9,6. Половину зразків було розташовано в рідині  $\text{NH}_3$ , іншу половину зразків в паровій фазі при температурі і тиску експерименту.

Проведено корозійні випробування зразків лопаток, вхідні кромки яких було зміцнено трьома способами: зміцненням СВЧ; електроіскровим легуванням традиційним сплавом Т15К6; вперше застосованим електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ-Ш.

Мікроструктура поверхні зразка зміцненого ЕІЛ сталлю 15X11МФ-Ш після впливу агресивного середовища наведена на рис.14.

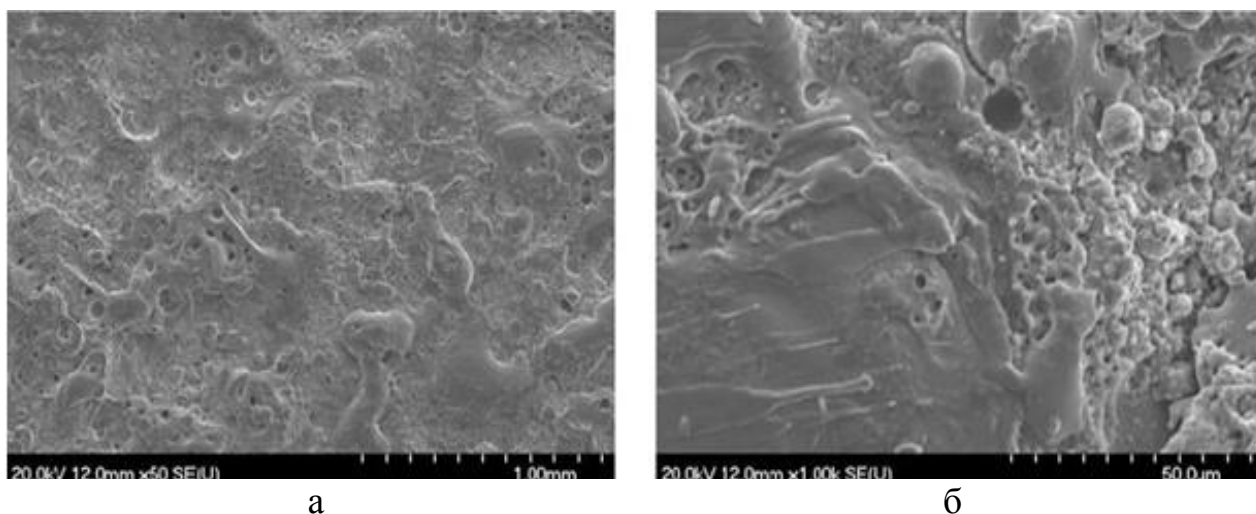


Рисунок 14 – SEM-зображення поверхні зразка, зміцненого ЕІЛ сталлю 15X11МФ-Ш, після впливу агресивного середовища:  
а – при збільшенні 50х; б – при збільшенні 1000х

Визначено морфологічні параметри поверхневих шарів зразків. Порівняння морфологічного, композиційного і корозійного аналізу зразків показало, що зразок, зміцнений традиційним сплавом Т15К6 методом електроіскрового легування, має найвищі параметри швидкості корозії 12 мкм/рік, тобто найгірший опір корозії (табл.4).

Таблиця 4 – Показники корозії зразків лопаток з різними способами зміцнення

№ зразка	Метод зміцнення	$E_{\text{корр}}$ мВ	$i_{\text{корр}}$ А см <sup>-2</sup>	$\beta_a$ мВ	$\beta_k$ мВ	Швидкість корозії мкм/рік
1	СВЧ	-255	$3,5 \cdot 10^{-8}$	300	180	0,4
2	ЕІЛ 15Х11МФ-Ш	-410	$4,9 \cdot 10^{-7}$	400	220	5,6
3	ЕІЛ Т15К6	-602	$2,3 \cdot 10^{-6}$	220	335	12,0

Фактично, нерівномірна корозія зразків, зміцнених електроіскровим легуванням, порівняно зі зразком, зміцненим струмами високої частоти, приводить до погіршення опору корозії. У цих зразках виявлено чутливість до локальної корозії, тому важливо при виконанні технологічних операцій електроіскрового легування отримувати шари з максимальною щільністю модифікованих легуючим електродом ділянок.

За результатами проведених випробувань найменшу швидкість корозії має шар, зміцнений загартуванням струмами високої частоти, найбільшу – шар, зміцнений електроіскровим легуванням традиційним твердим сплавом Т15К6. Швидкість корозії шару, зміцненого електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш, в 2,1 менше, ніж у шару, модифікованого сплавом Т15К6.

Механічна стабільність ерозійної стійкості випробовувалася на зразках лопаток з наявністю зміцненого шару. Впливали високою щільністю енергії з використанням ультразвуку, досліджувався ступінь порушення поверхневого шару кавітацією. Для експериментів використовувався прилад Hielscher УІП-1000, в якому застосовується диспергатор 1000 W, ультразвукова частота становила 20 кГц і з 100%-вою робочою амплітудою. Визначали вагу порошку, отриманого після сушки і визначали масу зразка лопатки.

Встановлено, що при зміцненні СВЧ зміна ваги зразка склала 41,1 г/м<sup>2</sup>, тоді як при зміцненні ЕІЛ 15Х11МФ-Ш вона була декілька більше 43,5 г/м<sup>2</sup>. Разом з тим вага продуктів реакції (порошку) при СВЧ склала 1,9 г/м<sup>2</sup>, а при ЕІЛ 15Х11МФ 1,1 г/м<sup>2</sup>.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що опір ерозійного руйнування поверхні зразка, зміцненого електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш, на 72 % вищий. Висока ерозійна стійкість поверхні сталі 15Х11МФ-Ш, зміцненої електроіскровим способом, обумовлена структурним станом: поєднанням легуваного мартенситу, залишкового аустеніту, а також присутністю складних карбідів Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> та Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Такий структурний стан досягається локальним розігрівом поверхні до температур плавлення і вельми швидким охолодженням мікрооб'ємів поверхневого шару при іскровий обробці.

У зв'язку з наявними фазовими перетвореннями в сталі, можна вважати, що після іскровий обробки поверхні, висока ерозійна стійкість обумовлюється також загартуванням певного шару вихідної структури.

Процеси ефективності запропонованих способів зміцнення вхідних кромки лопаток було досліджено в реальних умовах експлуатації на турбіні К-220-44-2 АЕС. Для проведення промислового випробування на АТ «Турбоатом» було виготовлено лопатки зі сталі 15X11МФ-Ш та їх зміцнено за різними способами: електроіскровим легуванням сплавом Т15К6; електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ-Ш; комбінованим способом; зміцненням струмами високої частоти на установці виробництва Німеччини.

Порівняльний аналіз інтенсивності руйнування при експлуатації проводився візуальним оглядом без демонтажу лопаток з ротора. Зовнішній вид лопаток після п'ятимісячної експлуатації представлено на рис.15.



Рисунок 15 – Зовнішній вигляд лопаток на ділянці радіусного переходу після експлуатації: а - зміцнення СВЧ по перу лопатки і електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ-Ш (5 місяців) ; б - зміцнення СВЧ виробництва Німеччини (5 місяців); в - зміцнення СВЧ по перу лопатки і електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ-Ш (2 роки)

Після п'яти місяців експлуатації лопатки, зміцнені електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ-Ш і комбінованим способом - СВЧ по перу лопатки і ЕІЛ сталлю 15X11МФ-Ш на радіусному переході, показали найкращі результати щодо опору експлуатаційного впливу, в тому числі і корозійно-ерозійному руйнуванню (рис.15 а, в). Площа і інтенсивність ерозійного руйнування вхідної кромки менше в 4 рази в порівнянні з лопатками, зміцненими іншими способами (рис.15 б).

Для порівняння було досліджено лопатки після двох років експлуатації для капремонту під час зупинок турбін з різних причин, які не стосуються поломок лопаток (рис.15 б). Як видно з представлених фотографій, руйнування вхідної кромки в зоні зміцнення струмами високої частоти по перу лопатки мінімальне, в зоні зміцнення на радіусі до полиці бандажу не виявлено зовсім. Ерозійні пошкодження, особливо у вигляді наскрізних промивів, відсутні по всій довжині лопатки.

Встановлено, що незважаючи на короткий термін експлуатації (2 роки), застосування СВЧ в комбінуванні з ЕІЛ зі зміцненням 15X11МФ-Ш на радіусі

лопатки має певні переваги. Вхідна кромка, зміцнена ЕІЛ сталлю 15X11МФ-Ш по всій довжині, має ерозійне руйнування на 10 % площі менше ніж зміцнена електроіскровим легуванням традиційним сплавом Т15К6. На підставі отриманих результатів було проведено заміну робочих лопаток на турбінах блока №3 АЕС «ПАКШ» на лопатки зі зміцненням по запропонованому комбінованому способу: загартування вхідних кромок струмами високої частоти, а на радіусі під бандажем – електроіскровим легуванням сталлю 15X11МФ-Ш.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі зроблено теоретичне узагальнення і запропоновано нове рішення науково-практичної задачі, яка полягає в розробці наукових і технологічних основ комбінованого поверхневого зміцнення вхідних кромок лопаток парових турбін для підвищення їх довговічності, що реалізується шляхом цілеспрямованого технологічного впливу на структуру і властивості. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Аналіз технічної літератури та сучасного стану проблеми руйнування і зносу робочих лопаток парових турбін, що працюють в пароводяному середовищі, показав, що застосовувані способи захисту від ерозійно-корозійного руйнування не забезпечують надійну експлуатацію. Дослідження, присвячені підвищенню довговічності робочих лопаток останніх ступенів парових турбін є актуальними.

2. Проведено дослідження впливу режимів термічної обробки на механічні властивості і структурний стан лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш. Рекомендована об'ємна термічна обробка для отримання необхідних властивостей складається з гартування з температур 990-1010 °С з охолодженням в оливу та відпуску при 690-710 °С, або калібрування, поєднане з гартуванням з температур 1050-1070 °С, середа охолодження олива, відпуск 680-710 °С, 3 години, охолодження на повітрі. Така термічна обробка забезпечує високі стабільні механічні властивості сталі, а також оптимальну структуру для наступного поверхневого зміцнення.

3. На основі експериментальних і теоретичних досліджень сформульований методологічний підхід, що дозволив визначити доцільність застосування пропонованих способів зміцнення, матеріалів і способів їх нанесення. Науково обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність зміцнення поверхні вхідних кромок робочих лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш електроіскровим легуванням цією ж сталлю. Виконано комплекс дослідно-технологічних розробок, проведено металографічні дослідження, визначено структурно-фазовий склад зміцнених шарів, аналіз механічних властивостей, корозійної стійкості. Дослідження підтвердили, що в результаті електроіскрового легування сталлю 15X11МФ-Ш, як матеріал лопатки, можна отримати захисний шар з високою твердістю за рахунок локального збільшення концентрації хрому до 44%.

4. Науково обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність зміцнення вхідних кромок робочих лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш комбінованим методом: загартуванням струмами високої частоти та електроіскровим легуванням однойменною сталлю 15X11МФ-Ш.

5. Розроблено і впроваджено новий спосіб захисту вхідних кромок лопаток, в якому поєднано два методи зміцнення – загартування струмами високої частоти та електроіскрове легування цієї ж сталю, яке проводять послідовно в єдиному технологічному циклі з перекиванням зони зміцнення.

6. Проведені корозійні випробування зразків лопаток, вхідні кромки яких зміцнені трьома способами: зміцненням струмами високої частоти; електроіскровим легуванням традиційним сплавом Т15К6; електроіскровим легуванням сталю 15Х11МФ-Ш. За результатами проведених випробувань встановлено, що найменшу швидкість корозії має шар, зміцнений загартуванням струмами високої частоти, найбільшу – шар, зміцнений електроіскровим легуванням твердим сплавом Т15К6.

7. Результати промислових випробувань, виконаних сумісно з АТ «Турбоатом» на турбіні К-220-44-2 АЕС «ПАКШ» (Республіка Угорщина), засвідчили ефективність розробленого нами методу зміцнення лопаток комбінованим способом. На базі АТ «Турбоатом» налагоджено серійне виготовлення робочих лопаток останніх ступенів роторів циліндрів низького тиску з використанням результатів проведених досліджень і розроблених технологічних рекомендацій.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. Hlushkova D.B., Hrinchenko O.D., Kostina L.L., Cholodov A.P. The choice of material for strengthening of leading edges of working blades of steam turbines. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. №1(113). P. 181-188. (*Scopus*).
2. Glushkova D.B., Grinchenko E.D., Nitchenko I.M. Investigation of the surface layer of a steam turbine blade reinforced with high-frequency currents. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. №2 (114). P. 128-132. (*Scopus*).
3. Глушкова Д.Б., Гринченко Е.Д., Костина Л.Л., Демченко С.В., Рыжков Ю.В. Материалы для упрочнения входных кромок рабочих лопаток газовых турбин. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2017. Т. 39. Вып. 12. С. 1647-1654. (*Scopus*).
4. Глушкова Д.Б., Гринченко Е.Д. Выбор оптимального материала для упрочнения входных кромок рабочих лопаток паровых турбин. *Науковий вісник будівництва*. 2016. № 3 (85). С. 248-252.
5. Glushkova D., Grinchenko E., Voronova Ye. Choise of optimum material for strengthening the entrance edges of stream turbines rotor blades. *Автомобильный транспорт: сб. научн. тр.* 2016. Вып. 39. С. 28-32
6. Глушкова Д.Б., Гринченко Е.Д. Исследование структурного состояния и механических свойств поверхностного слоя лопатки из стали 15Х11МФ, упрочненной токами высокой частоты. *Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр.* 2017. Вып. 77. С. 125-130.
7. Глушкова Д.Б., Гринченко О.Д. Дослідження структурного стану і механічних властивостей поверхневого шару лопатки зі сталі 15Х11МФ, зміцненої струмами високої частоти. *Наукові нотатки: міжвузівський збірник*. Луцьк, 2017. Вип. 59. С. 344-350.
8. Hlushkova D.B., Grinchenko E.D., Kostina L.L. Strengthening of the working edges

of the blades of steam turbines. *Вісник ХНАДУ:зб.наук. пр.* 2020. Вип. 88, т. 1. С. 37-45.

9. Глушкова Д.Б., Грінченко О.Д. Корозійна стійкість зміцнених шарів лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ. *Металознавство та термічна обробка металів*. Дніпро, 2020. Вип. 4(91). С. 45-51.

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

10. Глушкова Д.Б., Костина Л.Л., Рыжков Ю.В., Грінченко Е.Д. Упрочнение входных кромок рабочих лопаток паровых турбин. *Сучасні проблеми і технології забезпечення якості конструкційних матеріалів: матеріали міжнародної науково-технічної і науково-методичної конференції* (м. Харків, 22-23 вересня 2016 р.). Харків, ХНАДУ, 2016, С.25-29.

11. Глушкова Д.Б., Костина Л.Л., Демченко С.В., Грінченко Е.Д. Методы повышения точности при измерении твердости деталей. *Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2017: збірник доповідей 1-ї науково-технічної конференції з міжнародною участю* (м. Люблін, Польща, УТ НКТД, 2017). Люблін, КПІ, 2017, С.24-30.

12. Hlushkova D., Grinchenko E., Kostina I. Efficient method of strengthening the input chrome of the working steam turbine blades. *Сучасне матеріалознавство: ідеї, рішення, результати: матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків, 26-27 вересня 2019 р.). Харків, ХНАДУ, 2019, С. 75-82.

13. Грінченко О.Д. Дослідження корозійної стійкості зміцнених поверхонь лопаток турбін. *Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів: матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків, 24-25 вересня 2020 р.). Харків: ХНАДУ, 2020. С.140-146.

#### **Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

14. Патент 116611 Україна, МПК (2017.01) F01D D23P6/00. Спосіб зміцнення вхідної кромки лопатки останнього ступеня низького тиску ротора парової турбіни. Грінченко О.Д., Восковець В.Г., Глушкова Д.Б. патентовласники: Грінченко О.Д., Восковець В.Г., Глушкова Д.Б. - №u201613062, заявл. 21.12.2016, опубл. 25.05.2017, Бюл. №10/2017.

### **АНОТАЦІЯ**

**Грінченко О. Д. Матеріалознавчі основи підвищення довговічності лопаток парових турбін.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 «Матеріалознавство» (13 – Механічна інженерія). – Державний вищий навчальний заклад «Харківський національний автомобільно-дорожній університет»; Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі, яка полягає в розробці наукових і матеріалознавчих основ підвищення надійності та довговічності робочих лопаток останніх ступенів парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш, розробці і впровадженні способу зміцнення вхідних кромок лопаток для захисту

від ерозійно-корозійного руйнування на основі управління параметрами структури і функціональних властивостей.

На основі комплексного дослідження розроблено та впроваджено метод поверхневого зміцнення вхідних кромek лопаток парових турбін, що працюють в середовищі вологої пари. Проаналізовано вплив різних методів зміцнення на фізико-механічні властивості і структурний стан матеріалу лопаток.

Результати, рекомендації, висновки за виконаними дослідженнями використано і впроваджено при виготовленні лопаток на АТ «Турбоатом», що успішно експлуатуються на АЕС «Пакш», Угорщина.

**Ключові слова:** лопатка, загартування, струми високої частоти, електроерозійне легування, метод, структура, властивості, корозійна стійкість.

## SUMMARY

*Grinchenko O. Materials science bases for increasing the durability of steam turbine blades.* – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation for a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.02.01 «Materials science» (13 – Mechanical engineering). – State higher educational institution "Kharkiv National Automobile and Highway University". State Higher Educational Establishment «Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture» Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of scientific and technical problem, which consists in development of scientific and material bases of increase of reliability and durability of working blades of the last stages of steam turbines from steel 15X11MФ-III, development and introduction of a way of strengthening of entrance edges of blades for erosion-corrosion protection. management of structure parameters and functional properties. On the basis of the complex research the method of surface strengthening of entrance edges of blades of steam turbines working in the environment of damp steam is developed and introduced. The influence of different hardening methods on the physical and mechanical properties and structural state of the blade material is analyzed.

The results, recommendations, conclusions based on the performed research were used and implemented in the manufacture of blades at JSC Turboatom, which are successfully operated at Paks NPP, Hungary.

Many years of operation of steam turbines of various types at thermal and nuclear power plants have revealed a number of serious problems associated with the negative impact of ongoing operating factors. These factors, in particular, include wear and damage to the elements of the flowing part of the turbines, including drip erosion wear of the blades in the area of wet steam. It is established that the working blades of steam turbines fail prematurely as a result of the impact of drops, the impact of aggressive environments, mechanical stress, fatigue failure. The study of the experience of operation of the blade apparatus showed that with the same design of the blades has a great influence on the water-chemical balance. The presence of chemical elements and compounds in the turbine working fluid intensifies the process of erosion wear. The pH value of the working environment, which can fluctuate significantly during operation, has a significant effect on the characteristics of erosion wear.

Despite the extensive experience in creating various active and passive methods of erosion protection, accumulated so far around the world, there are still cases of damage to the blades of the last stages of steam turbines, due to the occurrence in the flow of erosion-hazardous drip moisture.

The rationale for choosing the research topic and its feasibility are due to the fact that there is a need to improve previously used and in the development of new methods to increase the durability of steam turbine blades by introducing new ways to strengthen the inlet edge of the blades. The problem of improving the methods of protection of turbine parts operating in the zone of phase transition of steam-water and today has not lost its relevance. One of the promising ways to increase the durability of the blades by reducing the erosion wear of the inlet edges of the blades is the use of high frequency current hardening in combination with electrospark alloying new materials to strengthen the blades, which is carried out consistently in a single technological cycle. This method of hardening provides reliable protection against the effects of drip erosion of the inlet edge, including the area of the radial transition to the bandage, which is not available for hardening by high frequency currents.

The solution of this important problem leads to the objective need to have a scientific basis for improving existing technologies to increase the durability of steam turbine blades, which led to the choice of topic, relevance of research based on its theoretical and practical significance, goal setting, scientific novelty and dissertation objectives.

The study was performed on samples from the blanks of blades made of steel 15X11MΦ-III, made by stamping.

Evaluation of material properties was performed using mechanical research methods, metallographic, X-ray diffraction, micro-X-ray spectral analysis, electron microscopy methods, determination of erosion resistance by ultrasonic dispersion, determination of corrosion resistance.

Peculiarities of structural transformations during continuous cooling of steel 15X11MΦ-III are investigated. Tests of mechanical properties of blades blanks after volume heat treatment performed in different modes are carried out. The obtained results confirmed the provision of the required set of mechanical properties.

The recommended volumetric heat treatment to obtain the desired properties consists of quenching from temperatures of 990-1010 °C with cooling in oil and tempering at 690-710 °C, or calibration combined with quenching from temperatures of 1050-1070 °C, oil cooling medium, leave 680-710 C °, 3 hours, air cooling. It is established that the microstructure of the blade material after hardening according to these modes is a sorbitol with an orientation along the martensitic planes.

To protect against erosion, we proposed to combine two methods of strengthening the inlet edge of the blades made of steel 15X11MΦ-III - hardening with high frequency currents and electrospark alloying with the same steel 15X11MΦ-III, which is carried out sequentially in a single technological cycle with overlapping hardening zone.

The mode of surface hardening with microwave heating is chosen, which provides the depth of the hardened layer of 0.5-3.0 mm with a hardness of 35-52 HRC. The width of the hardened zone from the edge of the inlet edge of the blade is 35-40 mm. The microstructure was studied and the phase composition of the blade layer strengthened by high frequency currents was determined. The microstructure is a martensite tempering



with the presence of carbides  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  and  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ .

The possibility of application of hardening by the method of electrospark alloying of steel 15X11MΦ-III, the blade of the same name with steel is substantiated. The complex of research and technological developments is carried out, metallographic researches are carried out, the structural-phase structure of the strengthened layers, the analysis of mechanical properties, corrosion resistance is defined. Studies have confirmed that as a result of electrospark alloying of steel 15X11MΦ-III it is possible to obtain a protective layer with high hardness by increasing the concentration of chromium to 44%.

The processes of efficiency of the proposed methods of strengthening the inlet edges were studied in real operating conditions on turbines K-220-44-NPP.

To conduct an industrial experiment at JSC "Turboatom" were made blades of steel 15X11MΦ-III and strengthened as follows.

The results of an industrial experiment after 2 years of operation showed that the proposed method of protection of the input edge, which consists in strengthening high-frequency currents along the blade and electrospark alloy steel 15X11MΦ-III radial transition, showed the best results. Erosion damage is detected in a smaller area compared to other methods of protecting the edges of the blades.

**Key words:** blade, hardening, high frequency currents, electrospark alloying, method, structure, properties, corrosion resistance.