

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Грінченко Олени Дмитрівни:

«МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛОПАТОК ПАРОВИХ ТУРБІН»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство

Актуальність обраної теми.

Тема дисертаційної роботи Грінченко О.Д. присвячена підвищенню ресурсу роботи лопаток парових турбін за рахунок впровадження механізмів комплексного зміцнення вхідних кромок лопаток для захисту від ерозійно-корозійного руйнування.

Використання відновлювальних джерел енергії, а також розробка і впровадження нових технологій для їх розвитку – це економічний пріоритет на сьогоднішній день для економіки нашої країни.

Разом з тим, внаслідок структури паливо-енергетичного комплексу, що склалася за минули роки, теплопостачання від тепло-, гідро- та атомних електростанцій є переважною. Для зниження собівартості електроенергії, що генерується, підвищення енергоефективності виробництва необхідне постійне зростання потужності енергетичного обладнання, що визначає підвищення експлуатаційних параметрів (навантажень, тиску, швидкості обертів, температури). Експлуатація енергетичного обладнання в цих умовах призводить до зносу його елементів, що, в свою чергу, визначає ресурс і надійність енергетичного устаткування в цілому.

Однією з найбільш важливих проблем, що виникають при експлуатації енергетичного обладнання є пошкодження робочих лопаток турбін циліндрів низького тиску внаслідок ерозійно-корозійного зносу.

Існує великий досвід створення різних активних і пасивних способів протиерозійного захисту, але досить спостерігаються випадки ушкоджень робочих лопаток останніх ступенів парових турбін, що обумовлені виникненням у проточній частині ерозійно-небезпечної крапельної вологи.

Одним з перспективних напрямків підвищення довговічності лопаток є застосування технології зміцнення кромки лопаток струмами високої частоти в комбінуванні з електроіскровим легуванням. Такий спосіб зміцнення забезпечує надійний захист від впливу краплеударної ерозії, включаючи ділянки, які недоступні для загартування струмами високої частоти. Разом з тим, не достатньо досліджено вплив різних типів зміцнення на мікроструктуру кромки лопатки, розподіл напружень та легуючих елементів,

Doc. N 34 - 05 - 01

12.03.2021

розподіл фаз, на стійкість лопаток к ерозійно-корозійному зносу та підвищення їх ресурсу.

Таким чином, дослідження, які спрямовані на вирішення цих питань, зменшення ерозійно-корозійного зносу, підвищення довговічності роботи лопаток парових турбін є актуальними як з наукової так і з практичної точок зору.

Ступінь обґрунтованості, повнота і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Отримані дисертантом наукові результати, сформульовані принципи і висновки мають наукову значимість та практичну цінність.

У роботі використані теоретичні та експериментальні методи досліджень. При проведенні експериментальних досліджень в лабораторних і промислових умовах використано стандартне обладнання, використано сучасні методи дослідження структури лопаток парових турбін у вихідному стані та після корозійних випробувань.

Достовірність отриманих результатів у цілому, пояснення наукових положень, висновків і рекомендацій не викликають ніяких сумнівів, оскільки теоретично обґрунтовані і мають експериментальне підтвердження. Вони підтверджені в багатьох роботах інших дослідників, апробовані на авторитетних міжнародних і українських наукових конференціях, семінарах, опубліковані у фахових виданнях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, 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».

Загальна характеристика змісту 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.

У вступі обґрунтовано вибір та актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами та темами; визначено особистий внесок здобувача та наведено відомості про апробацію та публікації результатів дисертаційної роботи.

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.

Аналіз експлуатації робочих лопаток показав, що робочі лопатки циліндрів низького тиску схильні до ерозійного зносу. Знос вхідних кромek пов'язаний з наявністю вологи в робочому тілі циліндра і часто ускладнюється зниженою температурою свіжої пари при збереженні розрахункового початкового тиску.

Автором показано, що ерозійні пошкодження є концентраторами напружень і можуть привести до втомного руйнування робочих лопаток. При значних втратах металу внаслідок ерозії знижуються міцнісні характеристики, порушується вібраційна відбудова лопаток і погіршуються аеродинамічні показники проточної частини.

Автор встановив, що незважаючи на велику кількість розроблених способів захисту вхідних кромek робочих лопаток турбін від шкідливого впливу краплеударної ерозії, стабільного та надійного результату не отримано.

У розділі розглянуто умови експлуатації, причини виходу з ладу і методи підвищення ерозійної стійкості лопаток парових турбін. Показано, що робочі лопатки парових турбін передчасно виходять з ладу в результаті впливу ударів крапель, впливу агресивного корозійного впливу, механічних напружень, втомного руйнування.

На підставі комплексного аналізу літературних джерел та наявного досвіду експлуатації турбін підтверджено актуальність обраної теми та сформульовано мету і 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.

Для виконання операцій зміцнення поверхні лопаток методом загартування струмами високої частоти використовувалася установка для загартування ВЧІ-63/044. Для зміцнення методом електроіскрового

легування використовувалася установка ЕІЛ - 8А.

Дослідження проводилося на зразках лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш, виготовлених методом штампування. Для поверхневого зміцнення методом ЕІЛ використовувалися корозійностійка високолегована сталь 15X11МФ-Ш і сплав твердий спечений Т15К6 (79% WC, 15% TiC, 6% Co).

У роботі застосовано сучасні методи та методики дослідження: світлова якісна мікроскопія; растрова скануюча мікроскопія; рентгено-структурний аналіз; визначення твердості за Віккерсом; стандартні методи механічних випробувань на розтяг; методи корозійно-ерозійних випробувань.

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

У розділі досліджено вплив режимів об'ємної термообробки на процеси структуроутворення та механічні властивості сталі 15X11МФ-Ш. Досліджено кінетику розпаду аустеніту сталі 15X11МФ-Ш при неперервному охолодженні та побудовано термокінетичну діаграму. Визначено температури критичних точок перетворення.

На підставі визначення механічних властивостей встановлені параметри об'ємної термічної обробки лопаток парових турбін: гартування з температур 990-1010 °C з охолодженням в оливі та відпуску при 690-710°C, або калібрування, поєднане з гартуванням з температур 1050-1070 °C, серед охолодження олива, відпуск 680-710 °C, 3 години, охолодження на повітрі. Встановлено, що після цієї обробки мікроструктура матеріалу лопаток складається з сорбіту з орієнтацією карбідів за мартенситними площинами.

Автором 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.

Мікроструктура поверхні кромки лопатки після зміцнення струмами високої частоти складається з безструктурного мартенситу або безголчастого мартенситу і карбідів Cr_3C_2 і Cr_7C_3 . Найбільша довжина голок мартенситу становить 0,2мкм. За результатами проведених досліджень був обраний оптимальний режим термообробки: відпуск для зняття напружень при температурі 330 °C тривалістю три години. Це забезпечує твердість кромки лопатки на рівні 35-52 HRC і стійкість від ерозійного руйнування в процесі експлуатації.

Структурні дослідження зразків в зоні зміцнення струмами високої

частоти показали присутність α -фази, а також незначну кількість карбідів Cr_3C_2 і Cr_7C_3 . Наявність дрібнодисперсних карбідів Cr_3C_2 , Cr_7C_3 забезпечує високу твердість загартованого шару. Підвищена інтенсивність рівня фону вказує на формування квазікристалічної структури в зоні зміцнення.

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

Досліджено розподіл залишкових напружень у шарі, зміцненому струмами високої частоти. Встановлено що в загартованому шарі по всій його глибині діють стискувальні залишкові напруження. На межі зміцненого шару з незагартованим металом залишкові стискуючи напруження переростають у розтягувальні, які рівномірно поширюються вглиб лопатки.

Недоступну для зміцнення струмами високої частоти, частину кромки лопатки вперше було запропоновано зміцнювати методом електроіскрового легування, використовуючи в якості легуючого електрода сталь того ж самого складу, як і сама лопатка - 15X11МФ-Ш.

Аналіз мікроструктури показав наявність дефектів у зоні зміцнення – пор. 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

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.

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 перекривання 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. 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 H/E 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 кромek лопаток, які зміцнені різними способами.

Встановлено, що процеси корозії лопаток турбін протікають достатньо повільно при температурі $+50^{\circ}\text{C}$. Тому для підвищення інтенсивності протікання цих процесів їх досліджували при підвищених температурах $+300^{\circ}\text{C}$ у середовищі NH_3 рН 9,6.

Встановлено, що зразок зміцнений традиційним методом електроіскрового легування має найгірший опір корозії (швидкості корозії 12 мкм/рік). Нерівномірна корозія зразків, зміцнених електроіскровим легуванням, порівняно зі зразком, зміцненим струмами високої частоти, приводить до погіршення опору корозії.

Автором встановлено, що найменшу швидкість корозії має шар, зміцнений струмами високої частоти, найбільшу – шар, зміцнений електроіскровим легуванням традиційним твердим сплавом Т15К6.

Ерозійну стійкість досліджували шляхом впливу кавітації на поверхневий шар. Встановлено, що при зміцненні СВЧ зміна ваги зразка склала $41,1 \text{ г/м}^2$, тоді як при зміцненні ЕІЛ 15Х11МФ-Ш вона була декілька більше $43,5 \text{ г/м}^2$. Разом з тим вага продуктів реакції (порошку) при СВЧ склала $1,9 \text{ г/м}^2$, а при ЕІЛ 15Х11МФ $1,1 \text{ г/м}^2$.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що опір ерозійного руйнування поверхні зразка, зміцненого електроіскровим легуванням сталлю 15Х11МФ-Ш, на 72 % вищий, що обумовлено структурним станом: поєднанням легованого мартенситу, залишкового аустеніту, а також присутністю складних карбідів Cr_3C_2 та Cr_7C_3 .

В реальних умовах експлуатації турбіни на АЕС «Пакш» було досліджено ефективність запропонованих способів зміцнення вхідних кромek лопаток. Після п'яти місяців експлуатації лопатки, зміцнені ЕІЛ сталлю 15Х11МФ-Ш і комбінованим способом - СВЧ + ЕІЛ сталлю 15Х11МФ-Ш, показали найкращі показники опору корозійно-ерозійному руйнуванню. Інтенсивність ерозійного руйнування вхідної крайки менше в 4 рази в порівнянні з лопатками, зміцненими іншими способами обробки.

Найбільш важливими результатами роботи, що мають наукову новизну, слід вважати:

— вперше встановлено, що поєднання методів поверхневого зміцнення струмами високої частоти та електроіскрове легування сталлю 15Х11МФ-Ш, дозволило підвищити твердість кромки лопатки зі сталі 15Х11МФ-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** для зміцнення методом електроіскрового легування вхідної кромки робочої лопатки парової турбіни, яка ідентична основному матеріалу лопатки, 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 встановлено залежності параметрів корозії від структурно-фазового стану зміцнених шарів лопаток зі сталі **15X11МФ-Ш**.

Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження.

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 оптимальні режими роботи установки «ЕІЛ-8А»: амплітудне значення струму імпульсу 175 ± 10 А, енергія імпульсу 3,15 Дж, Тривалість імпульсу 1000 мкс, частота, 600 Гц.

Впроваджено сумісно з АТ «Турбоатом» зміцнення запропонованим в дисертаційній роботі способом на лопатках турбін К 220-44-2 АЕС «Пакш», Республіка Угорщина.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях. Апробація результатів дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано 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.

Основні наукові положення та результати досліджень достатньо опробовані, доповідалися на міжнародних науково-практичних конференціях: «Сучасні проблеми і технології забезпечення якості конструкційних матеріалів» (м. Харків, 2016 р.); «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2017»(м.Люблін, Польща, УТ НКТД, 2017р.); «Сучасне матеріалознавство: ідеї, рішення, результати» (м. Харків, 2019 р.); «Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів» (м. Харків, 2020 р.).

Відповідність дисертації та автореферату встановленим вимогам.

Дисертація та автореферат оформлені згідно з діючими вимогами. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство (п. 1,2,5,7 напрямків досліджень). Автореферат за змістом є ідентичним основним положенням дисертації.

Основні зауваження щодо змісту дисертації.

Разом з високою оцінкою представленої кандидатської дисертації, слід відзначити такі зауваження:

1. Розділ 1 дуже об'ємний, складає більше 25% від всього об'єму дисертації. Так не повинно бути. У розділі проаналізовано умови експлуатації, причини пошкодження, технологічні схеми захисту лопаток парових турбін, проведено аналіз способів захисту лопаток парових турбін від ерозійного руйнування. Але нічого не говориться про мікроструктуру матеріалу лопаток. Як вона змінюється під час експлуатації, структурні механізми пошкодження.

2. Розділ 2. Стосовно методики дилатометричних досліджень. В якості еталону використовували сплав пірос, який в інтервалі температур від 0 до 100 °С характеризується повною оборотністю при нагріві та охолодженні. Фазові перетворення аустеніту у цій сталі відбуваються у діапазоні

температур 870...915 °С (при 0,14% С) тому мені здається, що в якості еталону потрібно потрібно використовувати відому сталь перетворення якої відбувається у цьому ж температурному діапазоні. Це зробить похибку визначення температур A_{c1} , A_{c3} меншою.

3. Розділ 3. Параграф 3.3.1 «Фізичні основи процесу електроіскрового легування» у якій автор згадує загальні положення ЕІЛ у цьому розділі недоречно. У цьому розділі представлено експериментальні результати дослідження автора. Цей параграф потрібно перенести у розділ 1 присвячений літературному огляду.

4 Розділ 3. Автор використовує електроіскрове легування кромки лопатки із сталі 15Х11МФ-Ш тою самою сталлю. У чому сенс такого застосування ЕІЛ? Чому у такій схемі обробці підвищується твердість та опір корозії?

5. Розділ 4. Основна частина лопаток працює в умовах корозійно-втомного руйнування та корозійного руйнування під напруженням. Чому не досліджувалось вплив цих умов на опір руйнуванню зміцнених лопаток парових турбін?

6. Скільки пропрацювали оброблені автором лопатки турбіни на АЕС «Пакиш» до ремонту? Яка частка оброблених лопаток вийшла з ладу? Більше, чи менше ніж зазвичай?

7. Є також ряд менш важливих зауважень. А саме. При викладенні результатів досліджень у ряді випадків автор не приводить конкретні значення досягнутих показників, а обмежується висловами: „збільшується”, „покращується”, тощо. Наведені у дисертації рисунки дуже дрібні, нічого не можливо розібрати. Автор у роботі використовує деякі специфічні терміни «об'ємної гарту і відпустку», «нанотвердість» та інші.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.

Дисертація Грінченко О. Д. на тему: «Матеріалознавчі основи підвищення довговічності лопаток парових турбін» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій одержано нові науково обґрунтовані результати, що полягають у визначенні комплексного впливу методів поверхневого зміцнення - загартування струмами високої частоти та електроіскрове легування на структуру, механічні властивості та опір ерозійно-корозійному руйнуванню лопаток парових турбін.

Робота викладена грамотною науково-технічною мовою, добре проілюстрована фотографіями мікроструктур, таблицями і графічним матеріалом.

Дисертаційна робота за актуальністю, змістом, науковою новизною, практичним значенням, достовірністю та обґрунтованістю отриманих результатів, повнотою опублікування результатів у наукових фахових виданнях, обсягом і оформленням відповідає основним вимогам до кандидатських дисертацій (п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів»), а її автор Грінченко Олена Дмитрівна – присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент

Провідний науковий співробітник

відділу Фізико-хімічних досліджень матеріалів

ІЕЗ ім.С.О.Патона

доктор технічних наук



В.А.Костін

Підпис д.т.н. Костіна В.А. засвідчую

Вчений секретар ІЕЗ ім.С.О.Патона



І.М.Клочков