

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.

Зростання потужності енергетичного обладнання вимагає підвищення експлуатаційних параметрів (навантажень, тиску, швидкості, температури), що ще більше посилює вплив експлуатаційних факторів на обладнання та призводить до зношування елементів його складових. Однією з найбільш важливих при експлуатації лопаток турбін циліндрів низького тиску є проблема ерозійно-корозійного пошкодження робочих лопаток парових турбін ТЕС і АЕС. Зі створенням нових більш потужних типорозмірів лопаток ця проблема відчувається все гостріше. Найбільш схильні до крапле-ударної ерозії вхідні кромки робочих лопаток, що призводить до зниження ефективності і надійності турбіни: зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) турбіни внаслідок збільшення профільних втрат, підвищення рівня вібрації, відриву фрагментів робочих лопаток, збільшення терміну простою турбіни при ремонті. Витрати при зупинці турбіни на ремонт складають мільйони гривень. В окремих випадках ерозійний знос може стати причиною серйозних аварій.

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

Одним з перспективних напрямків підвищення довговічності лопаток є застосування технології зміцнення кромок 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.

З точки зору пошуку можливих шляхів підвищення комплексу властивостей лопаток, встановлення закономірностей впливу способів зміцнення на структуроутворення, структурно-фазовий склад, корозійну стійкість поверхні вхідних кромок лопаток є доцільними і актуальними, а обрана здобувачем тема дослідження, спрямована на вирішення важливої і актуальної науково – технічної задачі - підвищення довговічності лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш за рахунок впровадження комплексного

Вис. № 84-05/09
12.03.2021

зміцнення вхідних кромek лопаток для захисту від ерозійно-корозійного руйнування є актуальною як з наукової так і з практичної точок зору.

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

Результати та висновки дисертаційної роботи є достатньо обґрунтовані даними експериментальних та теоретичних досліджень. Достовірність отриманих результатів досягається завдяки коректному використанню теоретичних положень матеріалознавства, комплексному використанню різних методів структурних досліджень та механічних випробувань, застосуванню сучасного дослідницького обладнання, ретельним та всебічним аналізом результатів експериментів. Про достовірність результатів роботи також свідчить апробація роботи на багатьох наукових конференціях різного рівня та позитивна оцінка на наукових семінарах.

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

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 та способів підвищення їх надійності.

Аналіз експлуатації робочих лопаток показав, що вони схильні до ерозійного зносу. Знос вхідних кромки 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 характеристики міцності, порушується вібраційна відбудова лопаток і погіршуються аеродинамічні показники проточної частини.

Виконаний аналіз літературних джерел показав, що незважаючи на великий досвід створення різних активних і пасивних способів протиерозійного захисту, як і раніше спостерігаються випадки серйозних пошкоджень робочих лопаток останніх ступенів парових турбін, обумовлені виникненням в проточній частині ерозійно-небезпечною крапельної вологи.

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 ВЧІ-63-044. Для зміцнення методом електроіскрового легування (ЕІЛ) використовувалася установка «ЕІЛ-8А».

Дослідження проводилося на зразках від заготовок лопаток і лопатках зі сталі 15X11МФ-Ш, виготовлених методом штампування. Для поверхневого зміцнення методом ЕІЛ використовувалися два сплави: корозійностійка високолегована сталь 15X11МФ-Ш і сплав твердий спечений Т15К6 (79% WС, 15% TiС, 6% Со).

Оцінювання властивостей матеріалів виконували з використанням сучасних методів та методик досліджень механічних властивостей, металографічного, рентгеноструктурного, мікрорентгеноспектрального аналізів, методів електронної мікроскопії, визначенням корозійної стійкості, ерозійної стійкості методом ультразвукового диспергування.

Лабораторні випробування 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 «Турбоа-

том» на АЕС «ПАКШ» в Республіці Угорщина.

У третьому розділі досліджено зміцнення заготовок лопаток об'ємною термічною обробкою, з подальшим 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 приведені результати досліджень впливу режимів об'ємної термообробки на процеси структуроутворення та механічні властивості сталі 15X11МФ-Ш. Наведені ізотермічні та термодинамічні діаграми розпаду аустеніту сталі 15X11МФ-Ш. Визначено температури критичних точок перетворення.

На підставі визначення механічних властивостей встановлені параметри об'ємної термічної обробки лопаток парових турбін: 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, середа охолодження олива, відпуск 680-710 °С, 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 в єдиному технологічному циклі два методи зміцнення вхідної кромки лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш – загартування струмами високої частоти та електроіскрове легування сталлю 15X11МФ-Ш, яке проводять послідовно. За результатами проведених досліджень був обраний оптимальний режим відпуску 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.

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

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.

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.

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. Раніше для зміцнення вхідних кромок лопаток зі сталі 15X11МФ-Ш застосовувався сплав Т15К6. Виконана порівняльна оцінка властивостей лопаток, зміцнених методом електроіскрового легування як сталлю 15X11МФ-Ш, так і Т15К6.

Аналіз мікроструктури шару, зміцненого методом ЕІЛ показав наявність дефектів у зоні зміцнення – пор. Розмір шару становить 0,3 мм. Рівень мікротвердості складає 6000-7500МПа. 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 перекивання 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 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 корозійної та ерозійної стійкості, промисловим випробуванням в реальних умовах експлуатації вхідних кромок лопаток, які зміцнені різними способами.

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 г/м², тоді як при зміцненні ЕІЛ 15Х11МФ-Ш вона була декілька більше 43,5 г/м². Разом з тим вага продуктів реакції (порошку) при СВЧ склала 1,9 г/м², а при ЕІЛ 15Х11МФ 1,1 г/м².

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 Cr₃C₂ та Cr₇C₃.

В умовах експлуатації турбіни на АЕС «Пакш» було досліджено ефективність запропонованих способів зміцнення вхідних кромки лопаток. Результати промислового експерименту після 2-х років експлуатації показали, що запропонований спосіб захисту вхідної кромки, який полягає в зміцненні струмами високої частоти по перу лопатки і електроіскровому легуванню сталлю 15Х11МФ-Ш радіусного переходу, показав найкращі результати. Ерозійне руйнування виявлено на меншій площі в порівнянні з іншими способами захисту кромки лопаток.

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 5500-7000МПа та підвищити опір ерозійно-корозійному руйнуванню за рахунок формування в поверхневому шарі структури легованого мартенситу, залишкового аустеніту та складних карбідів Cr₃C₂ та Cr₇C₃;

— вперше встановлено, що використання корозійностійкої сталі 15Х11МФ-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 установки 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 міжнародної наукометричної бази 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: збі-

льшення 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.

Вагомість і значущість виконаної дисертанткою роботи та достовірність отриманих результатів безперечні, але вважаю за потрібне висловити деякі зауваження:

1. Довговічність сталевих виробів включає в себе цілий комплекс механічних, фізичних та ін. властивостей (відносно механічних властивостей це зносостійкість, втомна міцність). Про це автор також вказує на с.7 автореферату. Але вказані характеристики в роботі не досліджувались.
2. В роботі запропоновано поєднувати два способи зміцнення вхідної кромки лопаток – загартування частини кромки струмом високої частоти, а іншої електроіскровим легуванням з перекриванням зони зміцнення. З точки зору забезпечення загальної надійності цих виробів важливим є надійність усіх зон зміцнення в т.ч. і зони перекривання. Але про це в роботі нічого не сказано (крім підвищення мікротвердості, с.141 дисертації).
3. Для забезпечення ерозійної стійкості задається глибина зміцненого СВЧ шару в дуже широкому діапазоні 0,5 - 3 мм і твердість також дуже в дуже широкому інтервалі - 35-52 HRC. Не досліджені закономірності формування структури при різних товщинах зміцнених шарів. Відмінності можуть бути значними.
4. На с.102 дисертації приведена таблиця 8 механічних властивостей сталі 15X11МФ-Ш після об'ємної термічної обробки. За цими результатами були визначені оптимальні режими термообробки. Але не зрозуміло як це було зроблено, адже режими термообробки не змінювались.
5. Не вказано за якими критеріями було вибрано оптимальний режим термічної обробки сталі 15X11МФ-Ш.
6. В дисертації та авторефераті є неточності та помилки: на с.6 автореферату один і той же абзац повторюється двічі; в дисертації є повтори (с. 109-110) та механічні помилки (с.182, 183).

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.

Дисертація Грінченко О. Д. на тему: «Матеріалознавчі основи підвищення довговічності лопаток парових турбін» є ґрунтовною та завершеною

кваліфікаційною науковою працею, в якій здобувачем вирішено важливу науково-прикладну задачу підвищення довговічності лопаток парових турбін зі сталі 15X11МФ-Ш за рахунок впровадження комплексного зміцнення вхідних кромок лопаток для захисту від ерозійно-корозійного руйнування на основі управління параметрами структури і функціональних властивостей. 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.

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

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 – заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, с.н.с.,

директор Інституту чорної металургії

ім. З. І. Некрасова НАН України



О. І. Бабаченко