

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут проблем машинобудування

ім. А. М. Підгорного



Нечасв Андрій Вікторович

УДК 621.165

**ДОСЛІДЖЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЗОВАНОЇ ПАРИ НА
РОБОЧІ ЛОПАТКИ ВОЛОГО-ПАРОВИХ ТУРБІН ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ
ЇХ ЗАХИСТУ**

Спеціальність: 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків-2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор технічних наук,
член-кореспондент НАН України
Тарелін Анатолій Олексійович
Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України
завідувач відділу загальнотехнічних
досліджень в енергетиці

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
Суботович Валерій Петрович
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри турбінобудування;

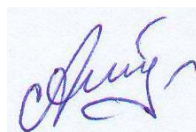
кандидат технічних наук,
Швецов Віктор Леонідович,
Публічне акціонерне товариство
«Турбоатом»,
головний конструктор парових турбін

Захист відбудеться «10» вересня 2020 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського 2/10, та сайті інституту <http://ipmach.kharkov.ua/>

Автореферат розісланий « 27 » липня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої
ради Д 64.180.02
доктор технічних наук
старший науковий співробітник



С. В. Альохіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В результаті досліджень волого-парових турбін, що проводяться останніми роками, було виявлено, що складні газодинамічні і теплові процеси супроводжуються виникненням в потоці робочого тіла супутніх електрофізичних явищ. Уперше експериментальні дані щодо електризації вологої пари на натурній турбоустановці були отримані співробітниками ІПМаш НАН України під керівництвом А. Тареліна на турбіні Т – 37/50–88 ТЕЦ – 2 "Есхар" в 1998 році. Детальні дослідження електрофізичних явищ в турбінах показали, що вони здатні істотно впливати на робочі процеси в проточній частині циліндру низького тиску, в конденсаторі і в цілому на ефективність роботи турбоустановки. Першопричиною електрофізичних явищ (ЕФЯ) у паровому потоці є спонтанна електризація краплинної вологи, внаслідок чого з'являється об'ємний електричний заряд. Нині встановлено, що максимальна густина об'ємного електричного заряду концентрується за останнім ступенем і може досягати 10^{-3} Кл/м³ при напруженості поля близько $2 \cdot 10^5$ В/м. Об'ємний заряд формується зарядженими краплями, їх електризація залежить від розміру крапель, рН, хімічного складу робочого тіла, а також від матеріалів проточної частини і лопаток турбіни. Як правило, великі ерозійно-небезпечні краплі заряджені позитивно, а дрібні – негативно. Особливістю процесів електризації і нейтралізації крапель в паровому потоці є їх локалізація на поверхні контакту крапель і металу. Внаслідок цього поверхні робочих лопаток, що зазнають інтенсивних механічних навантажень також зазнають і дії ЕФЯ, у тому числі електричного поля об'ємного заряду пари, яке має постійну і змінні складові, обумовлені змінами в часі величини і значення об'ємного заряду. Дія такого роду може інтенсифікувати ерозійно-корозійне ушкодження робочих лопаток турбіни, що призведе до скорочення їх ресурсу і зниження ефективності роботи турбіни.

Таким чином, вивчення пошкоджувальної дії пари, що електризується, на міцнісні властивості робочих лопаток парових турбін і розробка методів їх захисту від електрофізичних пошкоджувальних чинників є важливою науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є однією зі складових комплексу досліджень, проведених в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за бюджетними темами: "Розробка наукових основ нетрадиційних методів і засобів керування теплофізичними властивостями робочих середовищ теплових машин" № Д.Р.0297U001633; "Розробка теоретичних основ, методів і способів комплексного розв'язання задачі підвищення ефективності та надійності вихлопної частини енергетичних установок" № Д.Р.0197U012284; «Розробка наукових основ електрофізичних явищ в теплових енергетичних установках», № Д.Р.0100U004809;

«Розробка методів підвищення ефективності тепломасообмінних процесів в енергетичних установках при впливі на робоче тіло електричних, магнітних і електромагнітних полів», № Д.Р.0104U005621; «Розробка теоретичних основ і методів підвищення ефективності та надійності теплових установок за рахунок оптимізації режимних параметрів та активації робочих середовищ», № Д.Р.0109U001423; «Удосконалення методів оптимізації, контролю та управління термогазодинамічними та електрофізичними процесами, властивостями та якістю робочого тіла на різних стадіях технологічного циклу паротурбінних установок» № Д.Р.0114U001436, де автор був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей і фізичної природи впливу зарядженого парового потоку і супутніх ЕФЯ на міцнісні властивості поверхневого шару лопаткової сталі.

Для досягнення мети були поставлені задачі:

1. Встановлення характеру і міри впливу електризованого потоку вологої пари на вміст водню і мікротвердість в досліджуваних матеріалах.
2. Дослідження впливу постійного і змінного електричного поля на мікротвердість лопаткової сталі при пластичній деформації.
3. Уточнення фізичної моделі механізму пошкоджуваності матеріалу з урахуванням отриманих експериментальних результатів.
4. Розробка рекомендацій з ерозійного і електрохімічного захисту з урахуванням отриманих експериментальних даних.

Об'єкт дослідження – міцнісні властивості поверхневого шару лопаткових сталей 20X13 і 1X11МФШ.

Предмет дослідження – вплив електрофізичних явищ в проточній частині волого-парових турбін на мікротвердість поверхневого шару лопаткових сталей.

Методи дослідження: експериментальне визначення мікротвердості, експериментальне дослідження ЕФЯ, методи фізичного моделювання, комп'ютерного моделювання електричного поля, математичної обробки експериментальних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Уперше експериментально встановлено ефект істотного впливу зарядженого парового потоку на величину мікротвердості (понад 30 %), та на вміст водню в лопатковому матеріалі.
- Уперше експериментально досліджена залежність мікротвердості поверхневого шару лопаткового матеріалу від впливу постійного та змінного електричного поля.
- Запропоновано таку, що раніше не розглядалась в теорії турбомашин, концепцію пошкоджуваності поверхневого шару лопаткової сталі

краплями, яка враховує наявність електричного заряду ерозійно-небезпечних крапель і пов'язане з ним електричне поле.

- Вперше теоретично обґрунтовано виявлене експериментально збільшення вмісту водню при дії потоку, що електризується.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових методів ерозійних випробувань лопаткових матеріалів, при проектуванні волого-парових турбінних ступенів, при прогнозуванні ресурсу роботи робочих лопаток парових турбін, при організації заходів щодо захисту лопаток від несприятливого впливу зарядженого парового потоку та ЕФЯ.

На основі результатів дослідження запропоновано випарний спосіб запобігання утворенню ерозійно-небезпечної вологи у волого-парових турбінах. Спосіб дозволяє суттєво зменшити витрати пари на видалення вологи за рахунок регулювання нагріву напрямних лопаток по сигналу електричного зонду, що визначає наявність крапель в потоці робочого тіла, і сигналу термопари який обмежує перегрів. Крім того, запропоновано методи зниження негативного впливу електризації потоку на робочі лопатки турбіни шляхом раціонального вибору водно-хімічного режиму (ВХР) і використання покриттів на соплових лопатках які знижують ефект електризації робочого тіла, що дозволяє істотно (в 2 рази) підвищити ресурс робочих лопаток.

Особистий внесок здобувача. Оpubліковані матеріали повністю відповідають змісту дисертаційної роботи. У роботах, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: здобувач брав безпосередню участь в постановці завдання дослідження, розробці і виготовленні стенду, проведенні експериментів, обробці експериментальних даних [1, 5, 6, 7]; робота [2] здобувачем виконана самостійно; в роботі [3] здійснив огляд літератури і аналіз характеристик електромагнітного випромінювання що генерується електризованим потоком водного аерозолі; в [4] визначив робочий режим системи електризації пари на стенді; у роботі [8] виконав теоретичний аналіз можливості впливу електромагнітного випромінювання на теплофізичні властивості води; в роботі [9] брав участь в експериментальному дослідженні електромагнітного випромінювання робочого тіла натурної паротурбінної установки ТЕЦ- 2 "Есхар"; у [10] запропонував ідею контролю ерозійно-небезпечної вологи за допомогою електричного зонду; [11] написана здобувачем самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідалися і обговорювалися на: міжнародній науково-технічній конференції «Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019)» (2019 р., м. Харків,); XVI міжнародній науково-

технічній конференції «Удосконалювання енергоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (2017 р., м. Харків); XII міжнародній науково-технічній конференції НТУ ХП «Енергетичні та теплотехнічні процеси і устаткування» (2016 р., м. Харків); XV міжнародній науковій конференції «Удосконалювання енергоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (2015 р., с. Задонецьке, Зміївський р-н, Харківська обл.); IX міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (2013 р., м. Харків).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 11 наукових працях, з них 5 статей – у наукових фахових виданнях України (3 статті входять до наукометричних баз даних, 1 стаття в міжнародному журналі що індексується у базі Scopus), 1 патент України, 1 робота – матеріали міжнародної наукової конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 153 сторінок, з них: 116 сторінок основного тексту, 92 рисунків, 21 таблиць, 107 найменувань використаних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертації, сформульовані мета і задачі дослідження, показано наукову новизну і практичну цінність результатів, наведено загальну характеристику дослідження. Наведено інформацію про публікації та апробацію роботи на наукових конференціях, зв'язок роботи з науковими програмами, темами та особистий внесок здобувача.

У першому розділі наведено огляд науково-технічної інформації про феномен спонтанної електризації потоку водяної вологої пари в каналах і соплах парових машин. Розглянуто інформацію про феномен електризації металевого тіла в потоці аерозолі. Показано зв'язок цих явищ з процесами електризації пари і ротора у волого-парових турбінах. Розглянуто дослідження спонтанної електризації вологої пари і супутніх електрофізичних явищ в парових турбінах та їх вплив на ефективність і надійність, проведені А. Тареліним, В. Склярівим, М. Сурду. Показано що електризація крапель здатна впливати на ерозійні процеси в турбіні. Наведено зарубіжні дані про експериментальні дослідження зарядженості крапель в турбінах теплових і атомних станцій які провели чеські вчені V. Petr і M. Kolovratník, а також дані досліджень впливу електризації пари на процеси конденсації, здійснених фахівцями EPRI (USA), та J. Buckley в університеті Бірмінгема в Англії. Розглянута проблема ерозійного пошкодження деталей вологопарових турбін, обумовлена наявністю в робочому тілі крапельної вологи і

основні методи захисту від ерозії. Показано, що в роботах провідних фахівців, які вивчають проблему ерозійних пошкоджень у вологопарових турбінах, І. Фаддєєва, О. Шубенка, О. Ковальського, Р. Перельмана, В. Пряхіна, Ю. Качурінера, електрофізичні аспекти ерозійних явищ, як правило, розглядаються лише в контексті виникнення пошкоджень підшипникових вузлів при електризації ротора турбіни. Вплив електризації парового потоку на ерозійні процеси в сучасних модельних уявленнях ерозійних процесів у явній формі не враховується.

Аналіз наведеної в огляді науково-технічної інформації показав, що електризована волога пара і супутні електризації пари ЕФЯ здатні негативно впливати на конструкційні матеріали проточної частини волого-парової турбіни і в першу чергу на поверхні робочих лопаток, але в сучасних методах захисту від негативного впливу вологості парового потоку не враховуються пошкоджувальні фактори, обумовлені електризацією пари.

На основі аналізу стану проблеми сформульовані основні задачі дослідження та шляхи їх розв'язання.

У другому розділі Проведено аналіз особливостей впливу іонізованої пари і електричного поля на міцнісні властивості поверхні лопаткової сталі та визначено методологічний підхід дослідження. В якості інтегрального методу визначення міцнісних властивостей поверхневого шару лопаткової сталі був обраний метод дюраметрії. Для визначення електрохімічних факторів впливу електризованого парового потоку на лопаткову сталь використовувався метод термодесорбції водню.

Електризований водний аерозоль при контакті з лопатковою сталлю може активно взаємодіяти з її поверхнею, наслідком чого можуть бути зміни міцнісних властивостей поверхні. У зв'язку з цим першим етапом дослідження було вивчення наслідків контакту електрично активного аерозольного середовища (водяної вологої пари з зарядженими краплями води) з поверхнею лопаткового матеріалу, без краплеударної механічної дії. Для розв'язання цієї задачі була сконструйована і виготовлена випробувальна установка, що створювала електричне поле і низькошвидкісний струмінь водяного туману з зарядженими крапельками, який мав контакт з поверхнею досліджуваного зразка лопаткової сталі. Схема установки зображена на рис.1. Експериментальна установка дозволяла отримувати вологу пару, що витікає в атмосферу й конденсується. Генератором вологої пари був лабораторний котел ємністю 8 л, що працював при надлишковому тиску не більше 0,01 кПа. Як робоча рідина використовувалася дистильована вода. Продуктивність генератора вологої пари становила до 1 кг/год (0,28 г/с) з температурою пари на виході з паропроводу в атмосферу в діапазоні 100 ÷ 102 °С. Швидкість потоку була ~0,3 м/с. З котла паропроводом з підігрівом пара потрапляла в направляючу скляну трубку і, проходячи через дрібнокомірчасту нержавіючу сітку, на яку подавали

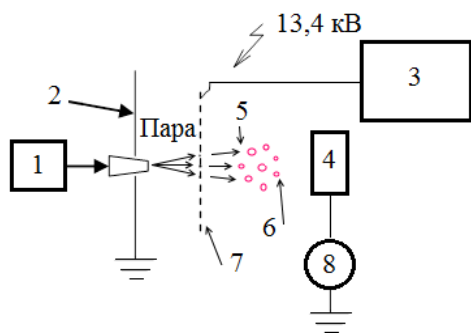


Рис. 1 Схема експериментальної установки:

1 – котел, 2 – екран, 3 – високовольтний генератор, 4 – зразок сталі, 5 – іонізований потік, 6 – іонний струм, 7 – сітчастий електрод, 8 – мікроамперметр

напрягу 13,4 кВ, заряджалася і у вигляді струменя туману витікала в атмосферу. За сіткою на відстані 15 мм розташовувався зразок лопаткової сталі, що обдувався струменем пари. Для дослідження використовувалися зразки лопаткової сталі 20X13. Вивчення мікротвердості зразків показало, що контакт з електрично активним аерозольним середовищем протягом 1,5 год знижує величину мікротвердості більш ніж на 50%, на

глибину інденування – до 4 мкм. На рис. 2, 3 показані об'ємні графіки із заповненням, що дозволяють наочно побачити якісну відмінність характеру зміни мікротвердості для вихідного стану зразка і після дії зарядженої пари. На рис. 4 відображена залежність мікротвердості від глибини інденування.

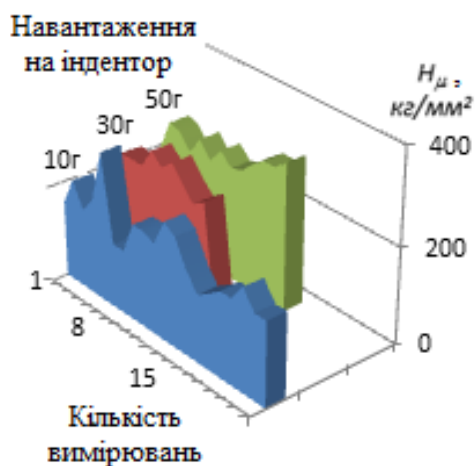


Рис.2 Вихідні значення мікротвердості H_{μ}

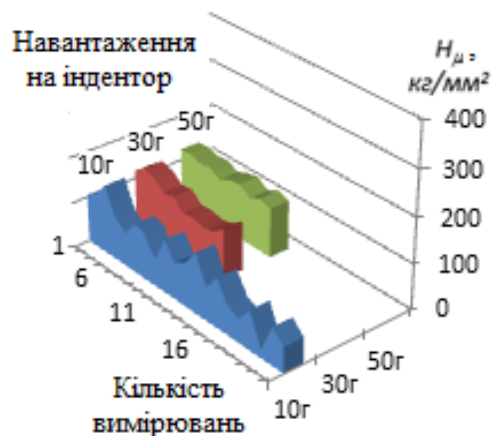


Рис.3 Значення мікротвердості H_{μ} після дії пари

На основі отриманих результатів було зроблено припущення, що провідну роль в спостережуваних змінах мікротвердості відіграє насичення поверхневого шару металу дифузійно-рухливими іонами водню, джерелом яких може бути електрично активне аерозольне середовище, утворене дисперговою водою. Однак крім впливу водню причиною зменшення мікротвердості міг бути і вплив інших позитивно заряджених частинок, що знаходяться в повітрі. Для верифікації цього припущення була визначена роль крапель води в такому експерименті: в експериментальній установці струмінь вологої пари був замінений на струмінь повітря зі збереженням усіх інших параметрів установки.

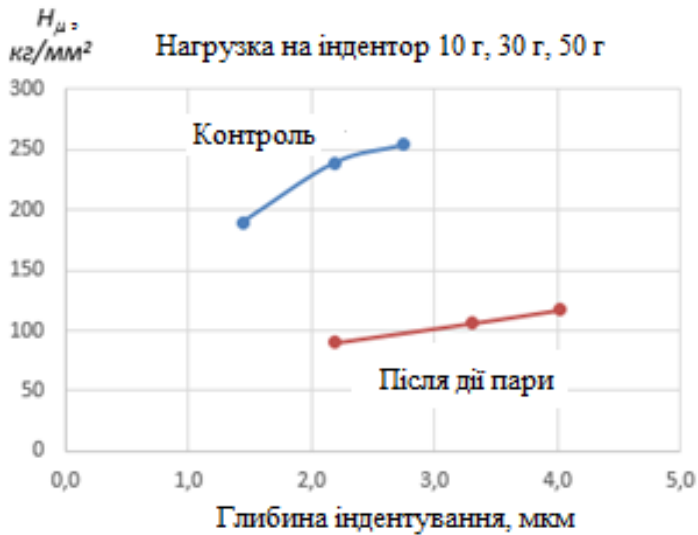


Рис. 4 Графіки значень мікротвердості до і після дії зарядженою парою

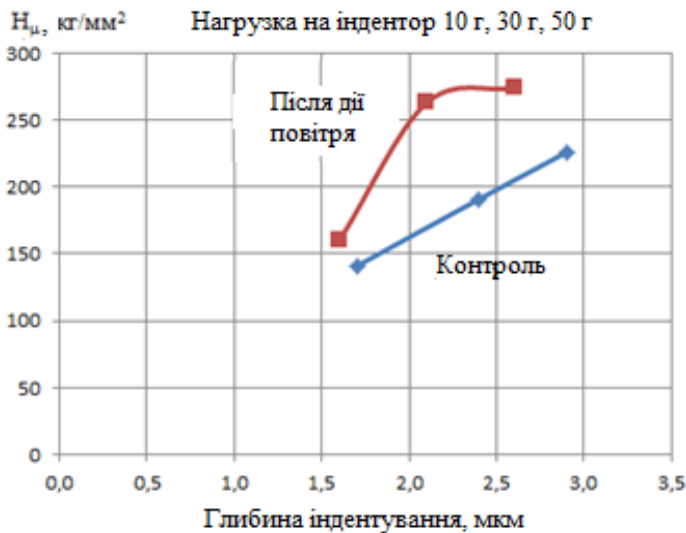


Рис. 5 Графіки мікротвердості до і після дії струменем повітря

незначної швидкості діючого потоку.

Наступним етапом дослідження, з урахуванням отриманих вище висновків, було вивчення комплексного механо-електрохімічного впливу зарядженого парового потоку на насичення воднем зразка лопаткової сталі, за надзвукової швидкості потоку пари, а також визначення кінетики зміни мікротвердості. Для розв'язання цієї задачі був підготовлений стенд, схема робочого процесу і структурна схема стенду наведена на рис.6 та 7.

Експеримент показав, що відсутність крапель води в потоці за інших умов, аналогічних першому експерименту, істотно змінює характер впливу на поверхневий шар лопаткової сталі. Після впливу потоку повітря, що пройшло через систему електризації установки, спостерігається зміцнення поверхневого шару. Ілюстрація мікротвердості наведена на рис. 5.

Отримані дані дозволяють зробити висновок про те, що при зміні властивостей робочого середовища за наявності ЕФЯ може знижуватися або збільшуватися стійкість поверхні металу до механічних навантажень. Зокрема, якщо робоче середовище має об'ємний позитивний заряд, то при контакті з поверхнею лопаткової сталі воно чинить знеміцнювальну дію. Найбільш вірогідним фізичним механізмом знеміцнюючого впливу в даному випадку є наводнення металу позитивно зарядженими іонами водню і активізація електрохімічних процесів на поверхні, причому наводнення металу відбувається навіть за

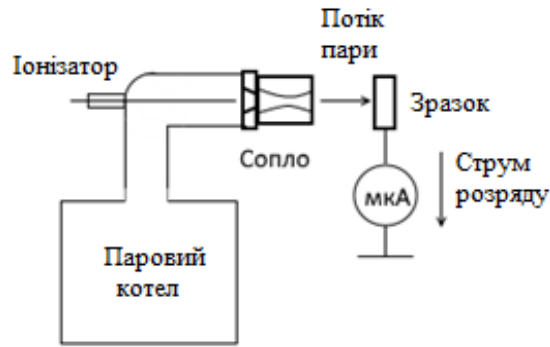


Рис. 6 Структурна схема процесу дії електризованої пари на зразок сталі в експерименті

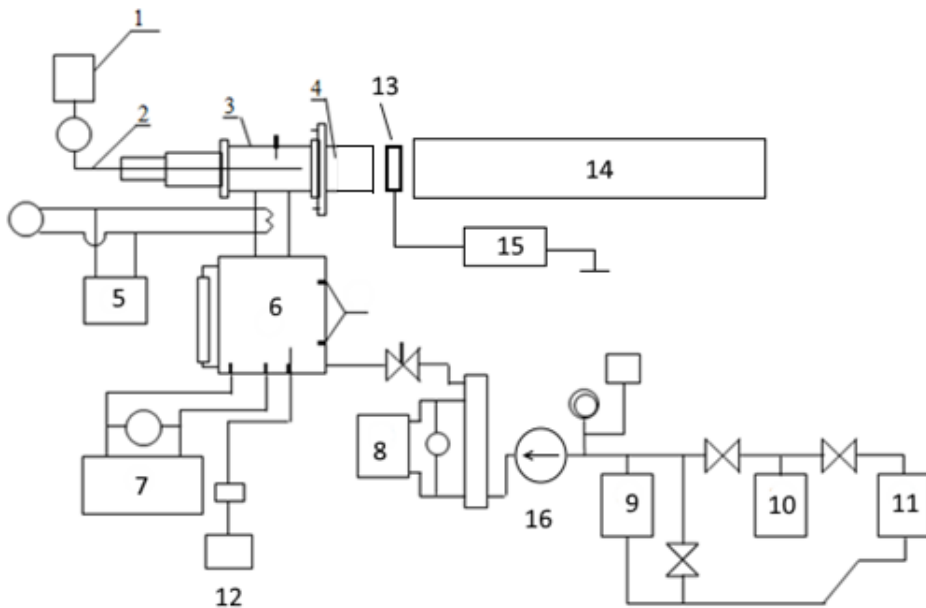


Рис.7 Схема парової установки з іонізацією пари коронним розрядом:
 1 – джерело високої напруги; 2 – високовольний ввід; 3 – іонізаційна камера котла; 4 – соплова частина іонізаційної камери; 5 – пароперегрівач; 6 – котел;
 7 – джерело живлення котла; 8 - система попереднього підігріву води; 9, 10, 11 – буферні ємності; 12 – вимірювач температури; 13 – зразок лопаткової сталі; 14 – паропровід скидання пари в атмосферу за межі лабораторії;
 15 – реєстратор струму заземлення; 16 – живильний насос

На стенді підтримувався режим роботи з тиском перед соплом $P \sim 176$ кПа, температура пари $t \sim 120$ °С, витрата пари $G \sim 2,3$ г/с, швидкість $v \sim 400$ м/с. Стенд дозволяв діяти на зразок нейтральним паровим потоком або потоком з різними видами електризації. Експерименти проводилися в трьох режимах іонізації пари: нейтральному, позитивному і негативному.

Використовувалися зразки сталі 15X11МФ, експерименти проводилися з різними варіантами іонізації пари і подачі електричного потенціалу на досліджуваний зразок. Концентрація розчиненого в зразках водню в залежності від режиму обробки наведено на рис.8.



Рис. 8 Вміст водню в зразках сталі

Режим обробки зразків парю: 0 – контрольний, (не оброблений парюю); 1 – пара суха перегріта нейтральна; 2 – волога пара нейтральна; 3 – волога пара негативно заряджена; 4 – волога пара позитивно заряджена. Результати дослідження показали, що найменше значення вмісту водню 0,65 ат. % відповідає впливу електронейтральної

пари незалежно від її вологості, а у оброблених електризованою парюю зразків вміст водню істотно вище (більше ніж в 3 рази). При цьому вплив і нейтральної і електризованої вологої пари викликає ефект наводнення.

Визначення кінетики зміни мікротвердості показало, що структурні і хімічні перетворення у поверхневому шарі лопаткової сталі найбільш активно протікають в перші 4-5 годин дії зарядженим паровим потоком. Цей факт був врахований в наступних експериментах.

Кінетичні криві зміни мікротвердості для одного з дослідів наведені на рис. 9. Під час аналізу всіх результатів вимірювання мікротвердості було виявлено, що частина експериментальних даних має суперечливий характер. Найбільш імовірною причиною цього був вплив атмосферного повітря і домішок в парі, що в умовах механо-електричної дії на поверхню металу сприяють утворенню плівки окислів та інших хімічних сполук.

Для коректного дослідження насичення лопаткової сталі воднем і зміни характеристик міцнісних властивостей поверхневого шару в умовах, максимально наближених до існуючих в турбіні, на стенді була змонтована вакуумована проточна частина, яка мінімізує вплив повітря в експерименті. В стенд була додана система конденсації пари, що дозволяло працювати в конденсаційному режимі. Крім того, до наявних можливостей електризації пара була додана можливість обробляти пар бар'єрним розрядом і отримувати електризований квазінейтральний потік.

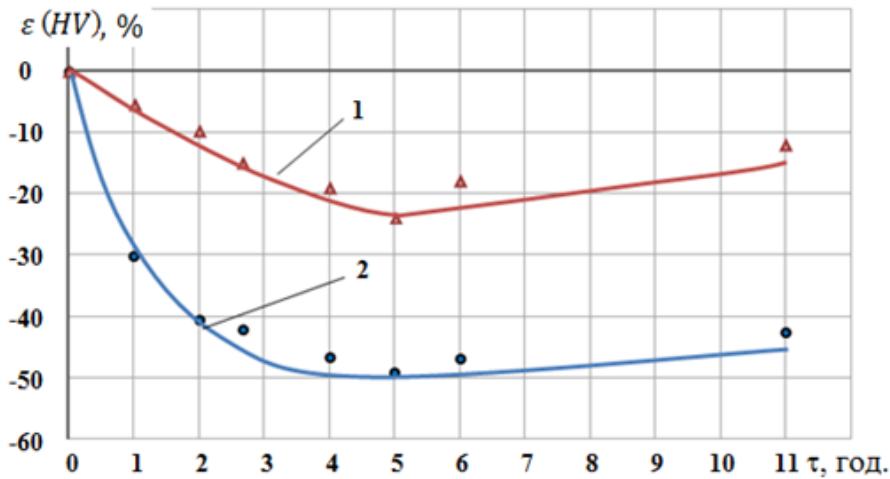


Рис. 9 Відносна зміна мікротвердості зразка сталі 1X11МФШ від дії позитивно іонізованої пари: 1 – навантаження на індентор 10 г; 2 – навантаження на індентор 50 г



Рис. 10 Загальний вигляд стенда з надзвуковим струменем пари

в конденсаторі підтримувався ~ 20 кПа, тиск перед соплом ~ 70 кПа, швидкість пари в робочому режимі ~ 400 м/с. За соплом в скляній проточній частині візуально спостерігався туманний факел пари, що конденсувалася.

Дослідження впливу квазінейтрального потоку було включено в план експериментів через те, що раніше під час проведення досліджень на термодинамічному стенді з використанням штучної іонізації потоку переохолодженої пари було зафіксовано підвищення ефективності процесу розширення на 2,5 %. Однак характер впливу такого середовища на робочі лопатки був невідомий.

В даному експерименті була поставлена додаткова задача вивчення дії на поверхню лопаткового матеріалу квазінейтрального середовища. Загальний вигляд стенда показаний на рис. 10, а схема стенду з модернізованою частиною – на рис. 11.

Стенд працював в конденсаційному режимі за таких параметрів: тиск

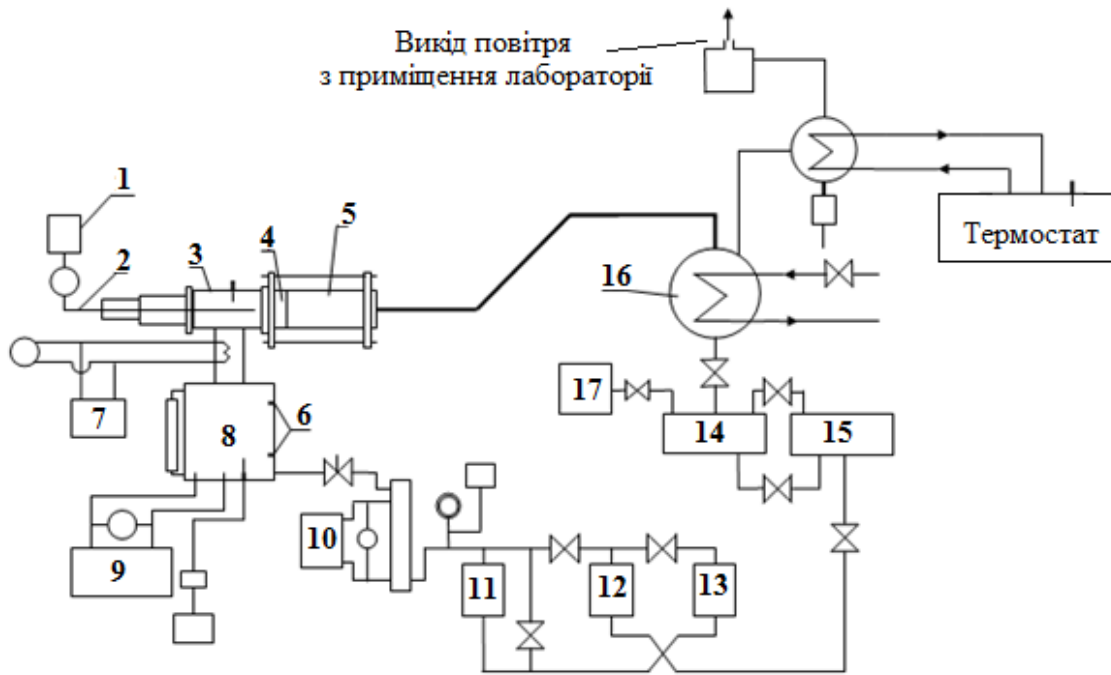


Рис. 11 Схема модернізованої парової установки: 1 – джерело високої напруги, 2 – високовольний ввід, 3 – іонізаційна камера котла, 4 – соплова частина з кріпленням зразка лопаткової сталі, 5 – проточна частина, 6 – датчики рівня води, 7 – пароперегрівач, 8 – котел, 9 – джерело живлення ТЕНів, 10 – підігрівач живильної води, 11 – живильний насос, 12 і 13 – буферні ємності, 14 і 15 – накопичувачі конденсату, 16 – конденсатор, 17 – вакуумний насос

Матеріалом для експериментів був вирізаний фрагмент із хвостової частини робочої лопатки ЦНД турбіни (сталі 15X11МФ). З цього фрагмента сталі були

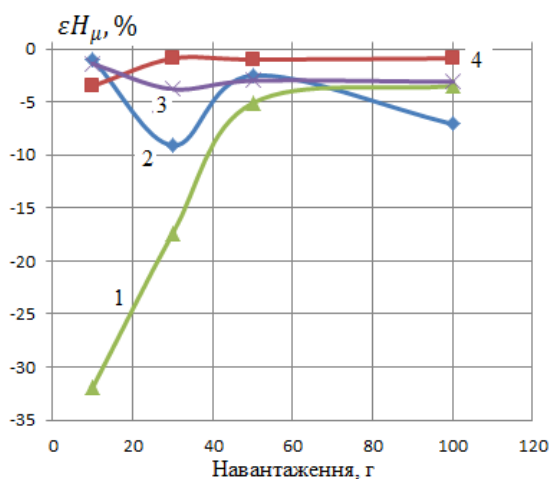


Рис. 12 Відносні зміни мікротвердості зразків сталі після дії парю: 1- позитивно заряджена; 2 - електронейтральна; 3 - квазінейтральна; 4 – негативно заряджена

нарізані зразки з розмірами 10×4×1,2 мм. Після обробки було проведено порівняльне визначення вмісту водню для різних режимів дії пари, яке показало що, як і в попередніх дослідах, найбільша кількість поглиненого водню була в разі впливу на зразок негативно і позитивно зарядженої пари. Наводнення після дії нейтральної пари значно менше.

Графіки відносної зміни мікротвердості після чотирьох годинної обробки парю

представлені на рис.12. З графіків мікротвердості видно, що найбільш знеміцнюючий вплив чинить позитивно електризований паровий потік. Невідповідність кількості поглиненого водню (вміст водню Н- більше, ніж Н+) до зміни мікротвердості в науковій літературі пояснюється відмінністю впливу на міцнісні властивості металу водню в різних активних формах Н⁺ і Н⁻. Водень в протонному стані активно впливає на міцнісні властивості, а частинки водню, що заряджені негативним електричним зарядом, як і водень в атомарному і молекулярному стані, діють на механічні параметри сталі значно менше. З отриманих даних випливає, що в цілому найбільш негативний вплив на лопаткову сталь чинить позитивно заряджений потік пари, негативний і квазінейтральний впливають на поверхню приблизно на рівні електрично нейтральної пари.

У третьому розділі наведено результати досліджень впливу постійних і змінних електричних полів на мікротвердість поверхневого шару зразків лопаткової сталі 15X11МФ. Наявність постійних і змінних електричних полів у натурній турбіні було зафіксовано експериментально під час проведення досліджень на турбоустановці Т-37/50-88 ТЕЦ-2 «Есхар». Виникнення постійних електричних полів обумовлено об'ємним зарядом потоку, а змінні поля виникають внаслідок нерівномірності руху і густини об'ємного заряду. Частоти змінних складових та їх гармоніки відповідають частотам пульсації потоку, частоті перерізу лопаткою кромкових слідів за напрямними лопатками, частоті коливань густини об'ємного заряду і лежать в області шириною близько 20 кГц.

Таким чином, в разі електризації потоку пари поверхні робочих лопаток зазнають комбінованої механо-електричної дії ударів крапель і електричного поля. Для моделювання аналогічної механо-електричної дії використовувався метод індентування з подачею електричного потенціалу на зразок. Для проведення досліджень була підготовлена випробувальна установка, що містила прилад ПМТ-3 і систему кріплення зразків, це дозволяло впливати на зразок електричним полем в момент індентування поверхні. Зовнішній вигляд установки зображений на рис. 17, схема організації процесу впливу на зразок наведена на рис. 18.



Рис. 17 Випробувальна установка для індентування зразків лопаткової сталі в електричному полі

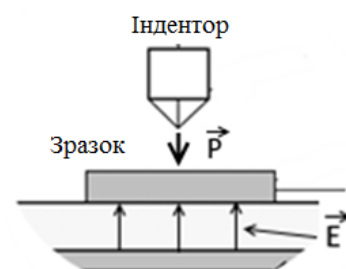


Рис. 18 Схема накладення поля \vec{E} і дії індентора

Спочатку була поставлена задача визначити наявність зміни мікротвердості під час інденування зразка з накладенням постійного і змінного електричних полів. Величина напруженості постійного поля (~ 8000 В/м) була обрана на основі аналізу електричних параметрів в проточній частині турбіни Т-37/50-88 ТЕЦ-2 «Есхар» при електризованому стані потоку пари. Для отримання такої напруженості у використаній електродній системі на зразок подавався потенціал 9 В. В результаті першого експерименту було виявлено, що мікротвердість поверхні зразка сталі зменшується під час інденування з навантаженням 10 і 20 г відповідно на 11 і 12 %. Дослідження дії змінного електричного поля проводилося при потенціалі 6 В і частоті 1000 Гц, в результаті мікротвердість поверхневого шару зразка сталі зменшилася на 22 %. Оскільки об'ємний заряд може бути як позитивним, так і негативним, в наступному експерименті було досліджено вплив на процес інденування електричного потенціалу 10 В різного знаку (таблиця 1).

Таблиця 1

| Навантаження на інденатор, г | Значення H_μ | | Відносна зміна $\varepsilon(H_\mu)$, % | Значення H_μ | | Відносна зміна $\varepsilon(H_\mu)$, % |
|------------------------------|------------------|--------------------|---|------------------|--------------------|---|
| | Початкове | Під напругою +10 В | | Початкове | Під напругою -10 В | |
| 10 | 157,9 | 140,5 | -11,0 | 128,7 | 141,1 | 9,6 |
| 20 | 172,2 | 150,7 | -12,5 | 154,5 | 156,8 | 1,5 |

З отриманих даних видно, що при позитивному потенціалі на зразку мікротвердість зменшується, а при негативному зростає. Більш детальне дослідження впливу потенціалу різного знаку на мікротвердість по глибині поверхневого шару (при різних величинах навантаження на інденатор) було

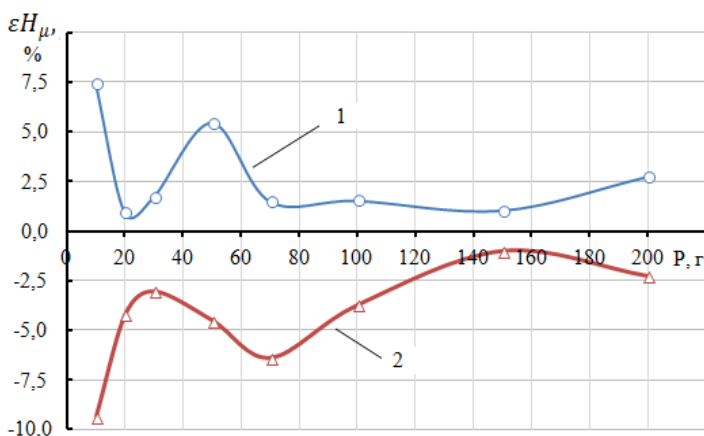


Рис. 19 Відносна зміна мікротвердості поверхні при негативній та позитивній поляризації зразка зі сталі 20X13: 1 – напруга $U = -1,5$ В; 2 – напруга $U = +1,5$ В

проведено в наступному експерименті (рис. 19). З графіка видно, що мікротвердість при подачі позитивного потенціалу зменшується, а негативного зростає. Ефект простежується до глибини інденування понад 4 мкм. Наступним етапом дослідження було визначення характеру впливу змінних електричних полів з частотами 20, 200, 2500 і 20000 Гц при потенціалі зразка 10 В на процес інденування. У дослідженні використовувався призматичний зразок зі сталі

15X11МФ. Мікротвердість визначали при трьох різних навантаженнях на індентор: 10, 20 і 100 г. Результати вимірювань наведені на рис. 20.

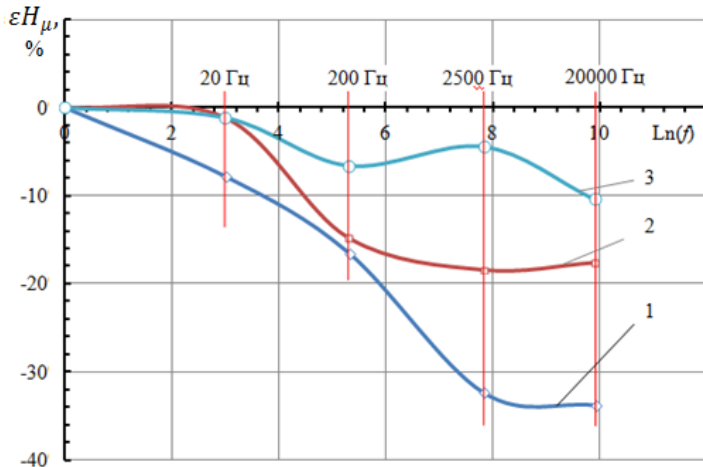


Рис. 20 Відносна зміна мікротвердості поверхні зразка зі сталі 15X11МФ в залежності від частоти змінного електричного поля напругою 10 В при навантаженнях: 1 – 10 г; 2 – 20 г; 3 – 100 г

З графіків видно, що змінне електричне поле істотно впливає на мікротвердість поверхні, величина зміни залежить від частоти, а найбільша зміна відбувається в тонкому поверхневому шарі.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки: електричне поле, як постійне так і змінне, що впливає на поверхню зразка лопаткової сталі, змінює мікротвердість за пластичної деформації. Вплив позитивного потенціалу, також як і дія позитивно заряджених крапель, чинить

знеміцнюючий вплив на поверхню лопаткової сталі. Негативний потенціал впливає менше і в даному випадку призводить до збільшення мікротвердості. Найбільш негативним є вплив змінного електричного поля, проте він проявляється переважно в тонкому (порядку мікрометра) поверхневому шарі. Максимальне зменшення мікротвердості в тонкому поверхневому шарі сталі може досягати величини порядку 30 %. Внаслідок цього при спільній дії ударів ерозійно-небезпечних крапель і електричного поля пошкоджуваність поверхні може виявитися істотно вищою, ніж в разі ударів лише нейтральних крапель.

Фізичний механізм зміни мікротвердості під впливом електричних полів, ймовірно, пов'язаний з перебудовою електронної структури поверхневого шару і відповідно зміною поверхневої енергії металу, що вимагає більш детальних досліджень в цьому напрямку. Викладені вище факти слід враховувати як при виборі ВХР, що впливає на електризацію і полярність потоку, так і при розробці заходів щодо збільшення ресурсу роботи лопаткових апаратів.

У четвертому розділі наведено аналіз проблеми фізичної інтерпретації пошкоджуваності поверхневого шару лопаткової сталі під впливом іонізованої пари та електричного поля. У розділі розглянуті сучасні моделі механізму пошкоджуваності поверхні сталі при крапельно-ударній ерозії. Показано, що ні в одній із загальноприйнятих моделей в явній формі не враховуються електричний заряд краплі і електрофізичні явища, які виникають при електризації вологопарового потоку. Робиться припущення про те, що в сучасних універсальних

математичних моделях ерозії електрофізичні фактори руйнування враховані в неявній формі у вигляді коефіцієнтів незнання, підбір величини яких дозволяє отримати задовільне узгодження розрахункових кінетичних кривих ерозійного пошкодження з експериментальними даними ерозійних випробувань. Однак фізичний сенс коефіцієнтів не завжди очевидний.

Сучасні математичні моделі ерозії ґрунтуються на концепції механічної дії ударів крапель, причому механічна дія крапель, як правило, відтворюється лише на ерозійному стенді і внаслідок цього розрахункова кінетика ерозійного процесу добре співпадає з експериментально визначеною в стендових умовах з мінімальним використанням поправкових коефіцієнтів. Але з натурних експериментів на турбінах відомо, що ерозійно небезпечна волога має електричний заряд, переважно сконцентрований у зоні периферійної частини робочих лопаток і, внаслідок цього, механізм ерозійного процесу в натурних умовах (за електризації робочого тіла) і в особливості на периферійній частині лопаток суттєво відрізняється від процесу на ерозійних стендах. Тому при моделюванні ерозійного процесу в натурних умовах виникає розбіжність теоретично розрахованої кінетики ерозії з експериментальними даними, величина якої максимальна для периферійної частини лопатки, цю розбіжність компенсують відповідними коефіцієнтами, фізичний сенс яких, в даному випадку, полягає в урахуванні впливу ЕФЯ.

В розділі розглянуто приклад такого роду, де використання коефіцієнтів, враховуючих в неявній формі ЕФЯ, дозволяє отримати теоретично розраховану кінетику ерозійного процесу, добре співпадаючу з експериментальними даними, є верифікаційний розрахунок ерозії лопаток останнього ступеню турбіни Т-200, проведений на базі універсальної математичної моделі ерозії¹.

Крім того в розділі наведено оцінювальний розрахунок наводнення лопаткової сталі робочих лопаток виникаючого в наслідок дії електризованої пари і електрофізичних явищ. Показано що за наявністю електричного заряду крапель, поверхня робочих лопаток опиняється під дією іонного струму і відбувається насичення воднем поверхневого шару лопаткового матеріалу, що призводить до деградації міцносних властивостей лопаткового матеріалу та може суттєво скорочувати інкубаційний період та інтенсифікувати крапельно-ударну ерозію.

В розділі зроблено висновок, що зміна властивостей робочого тіла в результаті електризації як функціонального і ерозійного середовища, викликає істотне посилення ерозійних процесів, що раніше не враховувалося при створенні математичних моделей та при проведенні ерозійних випробувань. Використання

¹ Шубенко А. Л. Математическое моделирование процессов течения влажного пара и оценка их воздействия на характеристики проточных частей турбин / А. Л. Шубенко // Дис. д-ра техн. наук. – Харьков, 1994. – 265 с.

концепції механо-електрофізичної дії, дозволяє дати фізичну інтерпретацію коефіцієнтам незнання і сприяти подальшому розвитку теорії ерозії.

П'ятий розділ містить практичні рекомендації щодо зменшення негативного впливу електризації робочого тіла і ЕФЯ на поверхневий шар робочих лопаток. Показано випарний спосіб видалення вологи з каналів направляючого апарата вологопарового турбінного ступеня з урахуванням електризації крапель (рис. 21).

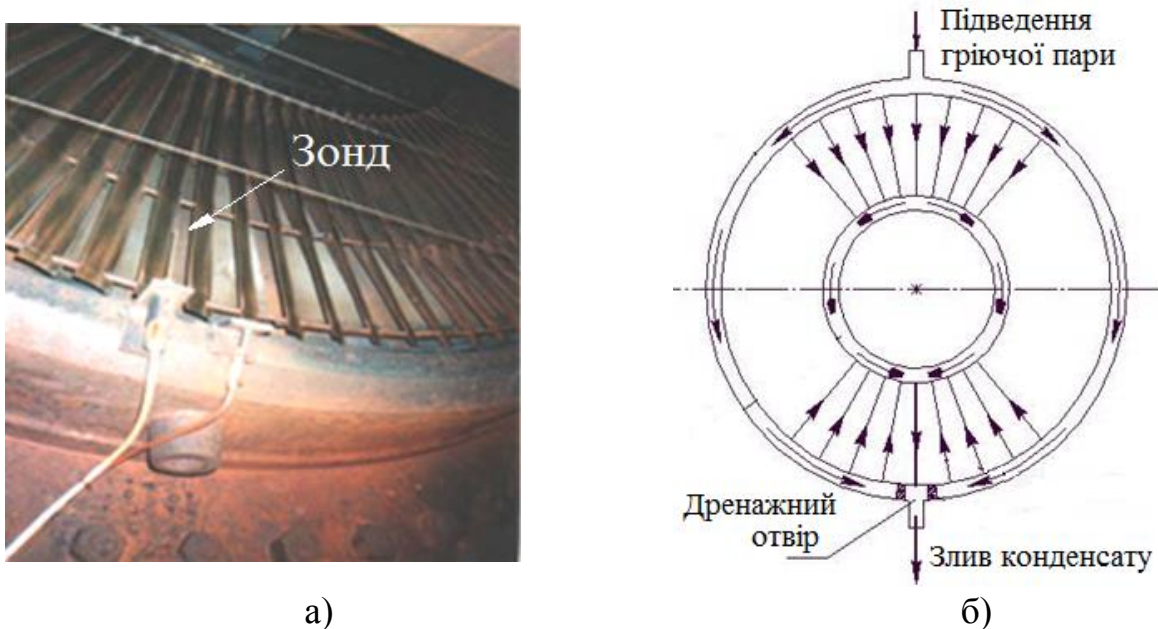


Рис. 21 Схема випарної системи вологовидалення: а) електричний зонд; б) схема протікання нагрівальної пари

Спосіб запобігання утворенню крупнодисперсної вологи у волого-паровому турбінному ступені може бути використаний в потужних конденсаційних турбінах ТЕС і АЕС. Спосіб включає контрольоване нагрівання всіх лопаток до оптимальної температури, за допомогою сигналу електричного зонда (рис. 21 а), що залежить від режиму роботи турбіни і вмісту крупнодисперсної вологи в потоці пари за робочими лопатками ступеня, а також сигналу термопари встановленої на зовнішній поверхні одній з напрямних лопаток. Нагрівання лопаток здійснюється паром, взятою з одного з попередніх вологопарових ступенів, спрямованою у внутрішні порожнини пустотілих лопаток направляючого апарата, а потім пара у вигляді конденсату або пароводяної суміші скидається через дренажний отвір (рис. 21 б), в конденсатор турбіни. Регулювання витрати пари на нагрівання напрямних лопаток за сигналами з електричного зонда і термопари дозволяє виключити неефективність використання пари і суттєво підвищити економічність системи вологовидалення.

Крім того для зменшення електризації пари пропонується вибір раціонального ВХР, використання нейтралізації потоку пари, використання покриття направляючих лопаток з матеріалів, що дозволяють мінімізувати електризацію

потоків або створюють негативну електризацію, що незначно знижує міцнісні властивості поверхні лопаток.

Запропоновані способи зменшення впливу електрофізичних явищ в турбіні на міцнісні властивості лопаткових матеріалів дозволяють комплексно розв'язувати задачу захисту лопаток і збільшення їх робочого ресурсу. На підставі отриманих в дисертації даних можна зробити висновок, що в разі мінімізації негативних факторів електрофізичних явищ можливо забезпечити збільшення інкубаційного періоду ерозії і ресурсу лопаток, не менше ніж у 2 рази.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена і розв'язана науково-практична задача дослідження негативного впливу електризованої пари на робочі лопатки волого-парових турбін і запропоновані методи їх захисту. Розв'язання цієї задачі дозволило отримати такі важливі наукові і практичні результати

1. Експериментально встановлено, що при контакті лопаткових сталей з потоком вологої пари відбувається збільшення концентрації водню в металі незалежно від того – заряджена пара або електро-нейтральна. Однак в разі контакту з зарядженою парою концентрація сорбованого водню найбільша (в 4 і більше разів), що призводить до погіршення міцнісних властивостей лопаткового матеріалу.

2. Встановлено, що вплив позитивно зарядженого потоку знижує міцнісні властивості поверхневого шару лопаткового матеріалу на 30–50 %. Позитивний заряд потоку спостерігається при найбільш поширених водно-хімічних режимах в турбінах. Вплив потоку з негативним зарядом і потоку зі штучною іонізацією є незначним (до 7 %), на рівні нейтрального потоку.

3. Експериментально встановлено, що штучна іонізація переохолодженої пари (що підвищує ефективність процесу розширення на 2,5 %), має незначний (до 7%) вплив на мікротвердість поверхневого шару лопаткового матеріалу.

4. Встановлено, що мікротвердість поверхневого шару лопаткового матеріалу змінюється при впливі електричного поля. Залежно від величини і знака електричного потенціалу на поверхні металу мікротвердість може збільшуватися або зменшуватися до 12 %.

5. При нерівномірному розподілі зарядженої крапельної вологи в проточній частині, а також при її нерівномірному русі виникає змінне електричне поле з частотою до 20 кГц. Встановлено, що вплив змінного електричного поля призводить до зміни мікротвердості поверхневого шару лопаткового матеріалу, а величина ефекту залежить від частоти. Максимальне зменшення мікротвердості в поверхневому шарі товщиною до 2 мкм може досягати 35 % в діапазоні частот $2,5 \div 20$ кГц.

6. Розроблено випарний спосіб волого-видалення крупнодисперсної вологи у волого-паровому ступені, що враховує зарядженість потоку робочого тіла і дозволяє мінімізувати витрати нагрівної пари.

7. Запропоновано рекомендації щодо зниження негативного впливу зарядженої пари корекцією ВХР, та використанням покриттів мінімізуючих електризацію пари, або електризуючих пару негативним зарядом що дозволяє збільшити ресурс робочих лопаток.

В цілому комплексне використання запропонованих способів запобігання електризації парового потоку і нейтралізації ЕФЯ дозволяє збільшити інкубаційний період і ресурс робочих лопаток не менше ніж в 2 рази.

Отримані результати залежності мікротвердості від електрофізичного впливу електризованої пари є базовим матеріалом для розробки інноваційних технологій що забезпечують збільшення експлуатаційної ефективності та надійності волого-парових турбін. Крім того результати дослідження можуть бути використані в інших галузях науки і техніки, зокрема в металообробці.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажно-парового потока на поверхностную прочность материалов лопаток турбины // *Termal Engineering*. 2020. №1. С. 72–81.
2. Нечаев А. В. Экспериментальное исследование воздействия постоянного и переменного электрического поля на прочностные свойства поверхностного слоя лопаточной стали // *Проблемы машиностроения*. 2019. Т.22, №1. С. 4–7.
3. Тарелин А. А., Нечаев А. В., Хиневич А. Е. Электромагнитные излучения в выхлопной части паровой турбины // *Проблемы машиностроения*. 2017. Т.20, №2. С. 18–21.
4. Тарелин А. А., Орловский В. П., Ковалев А. С., Нечаев А. В. Расчетно-экспериментальные исследования влияния ионизации пара на параметры влажнопарового потока в сверхзвуковом сопле // *Проблемы машиностроения*. 2016. Т.19, №2. С. 3–10.
5. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока и электрических полей на изменение механических свойств материалов рабочих лопаток турбин // *Вісник НТУ «ХПІ». Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2016. № 8. С. 107–115.
6. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние катодной поляризации стальной поверхности в парокпельном потоке на изменение ее микротвердости // *Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические теплотехнические процессы и оборудование*: 2013. № 14. С. 24–34.

7. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Электрофизические аспекты каплеударного разрушения элементов проточной части паровых турбин // Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические теплотехнические процессы и оборудование. 2012. № 7. С. 88–96.
8. Зима И. И., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Магнитные эффекты в воде и их влияние на теплофизические свойства // Вестник Инженерной академии Украины. 2010. №3–4. С. 178–183.
9. Зима И. И., Богданов Г. Ф., Нечаев А. В. Роторная спектроскопия потоков больших энергий // Вестник Харьк. политехн. ун-та. 1999. Вып.75. С. 93–97.
10. Спосіб запобігання утворенню великодисперсної вологи у волого-паровому турбінному ступеню / А. О Тарелін., В. П. Орловський, А. В. Нечаєв. власник Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. – № а 201512161; заявл. 08.12.2015; опубл. 12.12.15, Бюл. № 23. 5 с.
11. Нечаев А. В. Влияние электризованного влажнопарового потока на поверхностную прочность лопаток турбомашин // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019): Матеріали міжнар. наук.-техн. конф., (19 червня 2019 р., м. Харків). Х.: Харк. нац. ун-т імені В. Н. Каразіна. С. 51–52.

АНОТАЦІЯ

Нечаєв А. В. Дослідження негативного впливу електризованої пари на робочі лопатки волого-парових турбін та розробка методів їх захисту. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.16 – «Турбомашини та турбоустановки» (142 – енергетичне машинобудування) – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків, 2020.

Дисертація присвячена дослідженню фізичної сутності негативного впливу електризованої пари на робочі лопатки волого-парових турбін і розробці методів захисту. Дослідження спрямовано на підвищення ресурсу робочих лопаток волого-парових турбін в умовах виникнення в проточній частині електризації крапельної вологи і електрофізичних явищ. У процесі дослідження експериментально встановлено, що при контакті лопаткових сталей з потоком вологої пари відбувається збільшення концентрації водню, причому для випадку зарядженої пари концентрація сорбованого водню найбільша. Встановлено, що найбільш негативний вплив на міцнісні властивості поверхневого шару лопаток чинить позитивно електризований паровий потік. Вплив потоку з негативним зарядом і потоку зі штучною іонізацією незначний. Встановлено, що мікротвердість поверхневого шару лопаткового матеріалу змінюється при впливі електричного поля. Залежно від величини і знака електричного потенціалу на поверхні металу мікротвердість може збільшуватися або зменшуватися до 12 %. Встановлено, що вплив змінного

електричного поля приводить до зміни мікротвердості поверхневого шару лопаткового матеріалу, а величина ефекту залежить від частоти. Максимальне зменшення мікротвердості в поверхневому шарі товщиною до 2 мкм може досягати 35 % в діапазоні частот 2,5 – 20 кГц. Розроблено спосіб запобігання утворенню крупнодисперсної вологи, що враховує електризацію парового потоку, а також рекомендації, які дозволяють виключити або істотно знизити інтенсивність електрофізичних явищ у вихлопній частині турбіни і збільшити ресурс робочих лопаток.

Ключові слова: парова турбіна, електризація пари, електрофізичні явища, мікротвердість, наводнення.

ABSTRACT

Nechaiev, Andrii. Study of damaging electrified steam effects on the working blades of wet-steam turbines and development of methods for blade protection. – Manuscript.

A Thesis for the Academic Degree of Candidate of Sciences in Technology, Specialty 05.05.16 – “Turbo-machines and turbines” (142 – Power Engineering) - A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The thesis deals with the study of the physical nature of the electrified steam damaging effects on the working blades of wet-steam turbines and the development of methods for their protection. The study is aimed at enhancing the service life of the working blades of wet steam turbines under the conditions of the occurrence of condensed moisture electrifying and the electrophysical phenomena in the flow path part. In the course of the experimental study, it has been found that when the blade steels contact with a flow of wet steam, an increase of hydrogen concentration occurs, with the charged steam the concentration of sorbed hydrogen being the highest. A positively charged steam flow has been established to exert the most harmful impact on the strength properties of the surface layer of the blades, while the effect of a negatively charged flow is insignificant.

It has been revealed that the microhardness of the surface layer of the blade material changes when exposed to an electric field. Depending on the magnitude and sign of the electric potential on the metal surface, the microhardness can increase or decrease by up to 12 %. It has been shown that the action of a variable electric field leads to a change in the microhardness of the surface layer of the blade material, and the magnitude of the effect depends upon the frequency. The maximum reduction of microhardness in the surface layer up to 2 μm thick can reach 35 % within the frequency range 2.5 \div 20 kHz. A method for preventing the formation of coarse particle moisture, which takes into account the electrification of the steam flow, as well as the recommendations for eliminating or significant reducing the intensity of electrophysical phenomena in the exhaust part of the turbine and increasing the service life of the working blades, have been developed .

Keywords: steam turbine, steam electrification, electrophysical phenomena, microhardness, hydrogenation.

Підписано до друку 18.06.2020р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк-цифровий. Умовн. Друк. Арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 20062001

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua