

УДК 621.165

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕРОЗІЙНО- КОРОЗІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ЛОПАТОК ЦИЛІНДРІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ ПАРОВИХ ТУРБІН

**О. Л. Шубенко,**

член-кор. НАН України

[shuben@ipmach.kharkov.ua](mailto:shuben@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0001-9014-1357

**А. О. Тарелін,**

член-кор. НАН України

[tarelin@ipmach.kharkov.ua](mailto:tarelin@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0001-7160-5726

Інститут проблем  
машинобудування  
ім. А. М. Підгорного  
НАН України,  
61046, Україна, м. Харків,  
вул. Пожарського, 2/10

*Роботу присвячено вирішенню важливої проблеми, а саме розробці методу прогнозування інтенсивності ерозійно-корозійного руйнування матеріалу робочих лопаток ступенів низького тиску потужних парових турбін, що враховує комплекс складних фізичних процесів, які супроводжують виникнення, трансформацію ерозійно-небезпечних крапель та їх взаємодію з елементами проточної частини. Розглянуто особливості побудови деяких існуючих моделей ерозії. Докладно проаналізовано розроблену в Інституті проблем машинобудування НАН України модель, засновану на детерміновано-статистичному підході. Виконані під час дослідження розрахунки показали задовільний збіг із результатами експериментальних випробувань різних авторів, одержаними на краплеударних стендах, що сприяло успішному використанню моделі при створенні комплексного методу прогнозування зношування робочих лопаток. Для цього вона доповнюється методом визначення параметрів ерозійного середовища на базі рівняння руху крапель з урахуванням закону розподілу за розміром. Разом с тим показано, що розглянута модель, хоч і дозволяє на сучасному рівні здійснювати досить точне прогнозування розвитку ерозійного зносу, але має складнощі в побудові, пов'язані з необхідністю її ідентифікації за даними натурних експериментів, кількість яких обмежена. Встановлено, що однією з важливих причин розбіжностей є неврахування електрофізичної складової процесів, що відбуваються у двофазному потоці. У зв'язку з цим розглянуто результати комплексних досліджень електризації пари та її впливу на робочі процеси волого-парових турбін. Показано, що зміна властивостей робочого тіла як функціонального ерозійного середовища в результаті електризації викликає суттєве посилення (стосовно нейтральної вологої пари) електрохімічних процесів. При цьому змінюється кінетика накопичення пошкодження поверхневого шару металу за рахунок спільного протікання кількох негативних процесів: крапельно-ударного впливу; електрохімічних процесів, зумовлених механічною і структурно-хімічною неоднорідністю поверхні; абсорбції водню; зміни механічних властивостей під впливом електричного поля. Зауважено, що внесок абсорбції водню у зміни механічних властивостей найбільший. За попередньою оцінкою комплексний негативний крапельно-ударний та електрофізичний вплив на поверхню металу зменшує інкубаційний період та інтенсифікує ерозійно-корозійний процес приблизно в 2 рази.*

**Ключові слова:** парова турбіна, волога пара, робочі лопатки, краплеударне руйнування, математичне моделювання, електрофізичні ефекти, електрокорозійні процеси.

### Постановка задачі дослідження

Наявність у робочому тілі парових турбін рідкої фази викликає додаткові втрати енергії у ступенях, а різна щільність парової фази і вологи призводить до суттєвого неузгодження їх швидкостей, до складної картини руху краплинних потоків при значній концентрації великодисперсної вологи у верхній частині лопаткових апаратів і, як наслідок, їх інтенсивного ерозійного зносу.

У той же час розроблена теорія виникнення, трансформації та взаємодії краплинної вологи з елементами проточної частини поки що не дає задовільних пояснень багатьом фізичним ефектам, пов'язаним із присутністю краплинної вологи різної дисперсності, зокрема, електрофізичним процесам, які відбуваються в електризованому двофазному потоці, що й пояснює підвищений науковий інтерес до вивчення робочих процесів у вологопарових ступенях. Як і раніше, трапляються випадки серйозних пошкоджень робочих лопаток останніх ступенів, що зумовлено виникненням у проточній частині великодисперсної ерозійно-небезпечної вологи.

Таким чином, теоретичне й експериментальне вивчення причин і закономірностей ерозійного процесу робочих лопаток останніх ступенів залишається актуальним. Завдяки ґрунтовному і всебічному дослідженню вдасться вирішити важливу задачу стаціонарної енергетики – збільшення ресурсу парових турбін для ТЕС і АЕС.

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© О. Л. Шубенко, А. О. Тарелін, 2023

Важливим елементом віднайдення рішення цієї проблеми є створення методу прогнозування інтенсивності ерозійного зносу, що враховує комплекс складних фізичних процесів, які супроводжують виникнення, трансформацію ерозійно-небезпечних крапель та їх взаємодію з поверхнею лопаткових апаратів, без чого неможлива розробка ефективних протиерозійних заходів.

Досить докладний аналіз існуючих моделей ерозії проведено авторами у роботі [1]. Розглянуто моделі трьох поколінь – від повністю емпіричних 1-го покоління до моделей третього покоління, які враховують внесок у ерозійне зношення фізичних явищ, що виникають при утворенні, трансформації та взаємодії крапель рідини з елементами проточної частини, серед яких можна відзначити такі моделі, як: «IPM PAN» [2], Московського авіаційного інституту, розроблену під керівництвом Р. Г. Перельмана [3], ЦКТИ [4], фірми «Skoda» [5], Дж. Спрінджера [6] та ін. З останніх робіт слід згадати дослідження Московського енергетичного інституту (МЕІ) із питань моделювання процесів утворення, трансформації та взаємодії ерозійної вологи з елементами проточної частини [7]. Зауважимо, що загальним недоліком перелічених вище та інших існуючих моделей є їх неповна фізична обґрунтованість, що пов'язано передусім з ігноруванням кінетичної природи руйнування лопаткових матеріалів або з інтерпретацією моделей навантаження лопатки під дією ударів крапель. Спробу врахування цих обставин зроблено в моделі ПМаш НАН України, розробленій авторами [8]. Розглянемо її головні положення.

### Математична модель краплеударної ерозії ПМаш НАН України

Основними елементами структури інформаційної системи прогнозування зносу є, власне, модель ерозії робочих лопаток і модель утворення й трансформації вологи в проточній частині.

Задача прогнозування ерозії ставиться з позиції кінетичної концепції міцності. Ерозійна пошкодженість у заданій точці за час експозиції  $t_e$  визначається з рівняння

$$\int_0^{\omega} (1-\omega)^k d\omega = -\frac{1}{1+k} \int_1^{\psi} \psi^k d\psi = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot t_e \int_{r_R}^{\infty} r dr \int_0^{t_d} C[\sigma(r,t)]^k dt,$$

де  $n$  – крапельне навантаження (кількість крапель, що випадає в одиницю часу на одиницю площі поверхні);  $r$  – відстань від центру плями контакту;  $r_R$  – внутрішній радіус зони навантаження;  $\psi=1-\omega$  – параметр суцільності;  $\omega$  – параметр ерозійного пошкодження;  $C, k$  – константи ерозійного пошкодження;  $\sigma$  – найбільше розтягуюче напруження в точці, що розглядається;  $t_d$  – час дії навантаження від удару однієї краплі.

Часова залежність  $\sigma(r, t)$  визначається умовами в середині інтервалу  $0 \leq t \leq t_d$ , а просторова – законом затухання напруження вздовж осі  $r$ .

За часу експозиції  $t_{\text{exp}}$ , рівному часу інкубаційного періоду  $t_{\text{инк}}$ , відбувається руйнація, тобто  $\omega=1, \psi=0$ .

У прийнятій моделі ерозії навантаження в зоні взаємодії поділено на динамічне, зумовлене проходженням хвилі Релея, і більш тривале квазістатичне, що визначається процесом розтікання краплі.

Для визначення інкубаційного періоду маємо рівняння

$$t_{\text{инк}} = \left[ 2 \cdot \pi \cdot (k+1) \cdot n \cdot C \left\langle \int_{r_R}^{\infty} r dr \int_0^{t_R} [\sigma_R(r,t)]^k dt + \int_{r_R}^{r_{\text{инк max}}} r dr \int_0^{t_{\text{ст}}} [\sigma_{\text{ст}}(r,t)]^k dt \right\rangle \right]^{-1}, \quad (1)$$

де  $t_R = 0,25 \cdot d_k \cdot \frac{w_{\text{норм}}}{C_{\text{уд}}^2}$  – тривалість «навантаження хвилею Релея»;  $C_{\text{уд}}$  – швидкість ударної хвилі в

рідині краплі, що падає;  $t_{\text{ст}} = \frac{r^2 - r_R^2}{d_k \cdot w_{\text{норм}}} - \frac{r - r_R}{C_R}$  – тривалість дії квазістатичного навантаження;  $C_R$  –

швидкість хвилі Релея.

У результаті інтегрування рівняння (1) після підстановок і спрощень отримаємо

$$t_{\text{инк}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (k+1) \cdot C} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} n_i \frac{\sigma_{Ri}^k \cdot d_{ki}^3 \cdot w_{ni}^3}{C_R^4} \left\langle \frac{A_R}{k-1} - \frac{A_{\text{ст}i} \cdot (k+1)}{(k-1) \cdot (k-2) \cdot (2k-3)} \right\rangle \right]^{-1}, \quad (2)$$

де  $d_k$  – діаметр  $i$ -ої краплі;  $w'_{ni}$  – швидкість нормального зіткнення  $i$ -ої краплі;  $\sigma_{Ri}=0,75 \cdot P'_{серi}$  – максимальне розтягуюче напруження у хвилі Релея від дії  $i$ -ої групи крапель залежно від усередненого тиску на плямі контакту;

$$A_R = 0,18 \cdot \frac{C_R^2}{C_{уд}^2} - \text{динамічна константа, що виникає у процесі інтегрування за часом динамічного навантаження;}$$

де  $A_{ст}$  – статичний комплекс

$$A_{ст} = 0,0216 \cdot \left[ \frac{0,463 \cdot (1 - 2\nu) \cdot C_R^2}{C_{уд}^2 \cdot w'_n} \right]^k$$

для  $i$ -ої групи крапель, що виникає у процесі інтегрування за часом дії квазістатичного навантаження.

Вираз (2) є основним результатом теорії, тому що значення інкубаційного періоду  $t_{інк}$ , яке характеризує властивості матеріалу, що розглядається з точки зору його здатності протистояти руйнуванню, може бути інтерпретований як універсальна характеристика зносу (рис. 1). Воно служить основою для вирішення загальної задачі про рух фронту руйнування вглиб деталі.

Виконані розрахункові дослідження показали задовільний збіг із результатами випробувань (рис. 2), одержаними на краплеударних стендах, що сприяло успішному використанню розробленої моделі при створенні комплексного методу прогнозування зношування робочих лопаток [8].

Для цього воно має бути доповнено методом визначення параметрів ерозійного середовища, тобто кінематичних характеристик крапель. Це робиться на базі рівняння руху краплі (3) з урахуванням закону розподілу крапель за розмірами у кромковому сліду й визначення маси найбільшої краплі за критичним значенням критерію дроблення Вебера

$$\frac{d\bar{C}'}{dt} = 0,75 \cdot C_x \cdot d_k^{-1} \cdot \rho'' \cdot (\rho')^{-1} \cdot C_{відн} \cdot (\bar{C}'' - \bar{C}'), \quad (3)$$

де  $C_{відн} = \left| \bar{C}'' - \bar{C}' \right|$  – швидкість основного потоку щодо краплі;  $C_x$  – коефіцієнт опору краплі, що рухається в потоці;  $\rho''$ ,  $\rho'$  – щільність пари й рідини відповідно.

Нарешті, для остаточного замикання запропонованого методу прогнозування зношування робочих лопаток в умовах експлуатації турбін розглянуто можливість ідентифікації моделі ерозії на базі даних натурального експерименту. Для її реалізації використано апарат лінійного регресійного аналізу. На рис. 3 показано результати ідентифікації стосовно вхідних кромки робочих лопаток останнього ступеня турбіни 200 МВт за даними натурних спостережень за розвитком ширини зони зносу [9].

Деякі приклади використання запропонованої моделі для прогнозування ерозійного зношування лопаткових матеріалів показані на рис. 4, 5.

Разом із тим модель, що розглянуто, хоч і дозволяє на сучасному етапі здійснювати досить точне прогнозування розвитку ерозійного процесу за рахунок використання комбінації детермінованого і статистичного підходів до її побудови, проте має, як і інші згадані моделі, ще один недолік. У ній відсутній прямий облік складних електрофізичних явищ, що виникають у проточній частині турбіни у разі появи краплинної вологи.

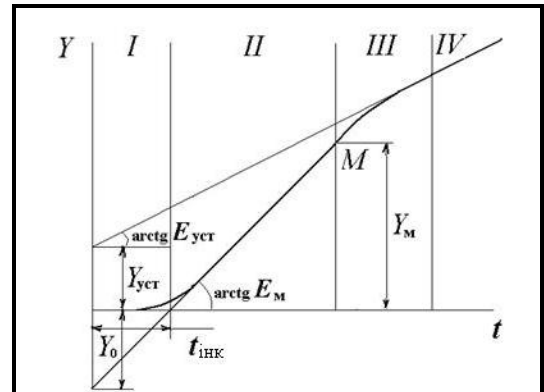


Рис. 1. Кінетична крива ерозії

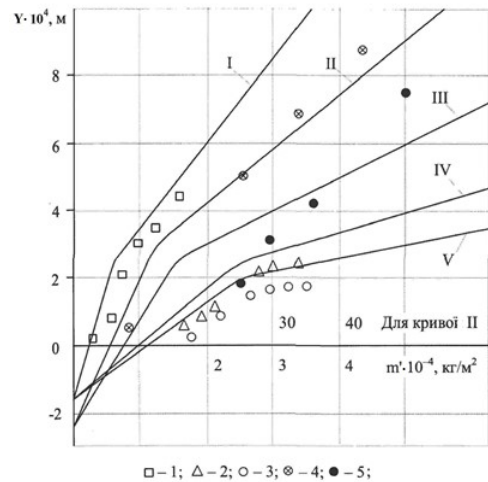


Рис. 2. Кінетичні криві ерозійного зношування зразків із матеріалу 20X13:

- I, IV, V – 20X13, HB=170–181;
- II, III – 20X13, HB=241–260;
- 1, 2, 3 – дослідження МЕІ (20X13, HB=181);
- 4, 5 – дослідження ЦКТІ (20X13, HB=241);
- I, 1 –  $d_k=1100 \times 10^{-6}$  м,  $w'_n=300$  м/с;
- IV, 2 –  $d_k=820 \times 10^{-6}$  м,  $w'_n=250$  м/с;
- V, 3 –  $d_k=690 \times 10^{-6}$  м,  $w'_n=250$  м/с;
- I, 4 –  $d_k=900 \times 10^{-6}$  м,  $w'_n=240$  м/с;
- III, 5 –  $d_k=900 \times 10^{-6}$  м,  $w'_n=360$  м/с

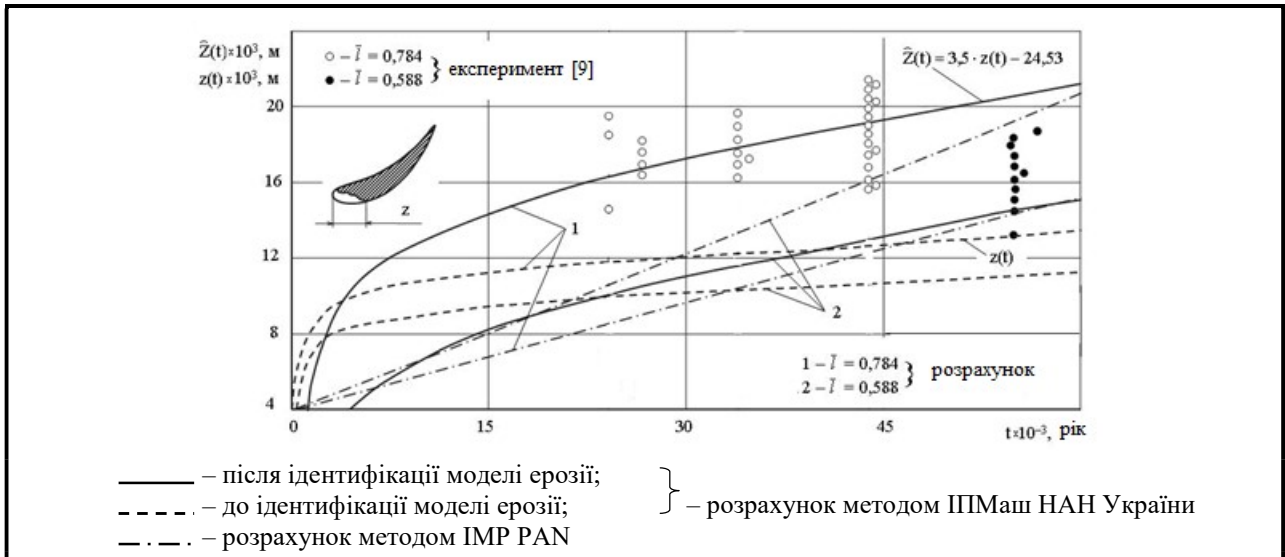


Рис. 3. Ширина зони зносу робочої лопатки на ділянках останнього ступеня різної висоти турбіни 200 МВт

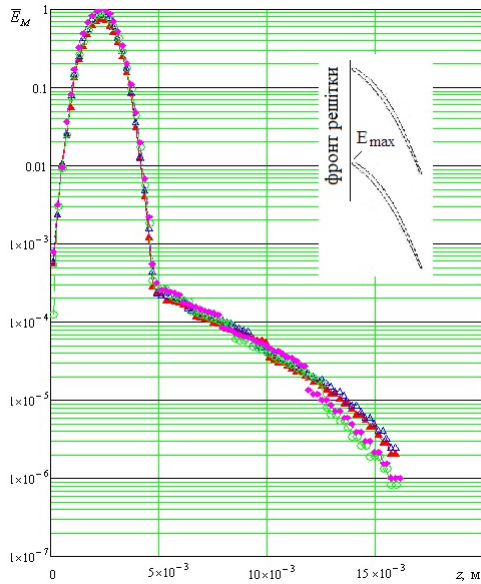


Рис. 4. Зміна відносної швидкості ерозії  $\bar{E}_M = E_M / E_{M_{max}}$  на вхідній кромці робочої лопатки ЦНТ:

- ▲ –  $\bar{E}_{M_1}$  ( $C_1=246$  м/с,  $L_z=56$  мм);
- Δ –  $\bar{E}_{M_2}$  ( $C_1=246$  м/с,  $L_z=49,5$  мм);
- –  $\bar{E}_{M_3}$  ( $C_1=280$  м/с,  $L_z=56$  мм);
- ◆ –  $\bar{E}_{M_4}$  ( $C_1=280$  м/с,  $L_z=49,5$  мм)

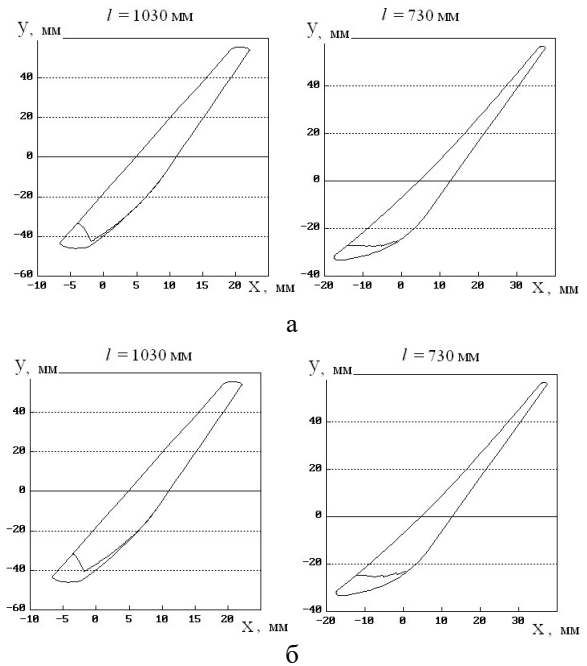


Рис. 5. Розрахунок ерозійних пошкоджень робочої лопатки останнього ступеня турбіни К-220-44-2М АТ «Українські енергетичні машини» у периферійній зоні на номінальному режимі експлуатації:  
а – 20 тис. годин експлуатації;  
б – 100 тис. годин експлуатації

Як показано у дослідженнях, виконаних під керівництвом чл.-кор. НАН України А. О. Тареліна [10], наявність заряджених крапель у проточній частині турбіни може супроводжуватися комплексом явищ, що призводять до інтенсифікації ерозійно-корозійного зносу лопаткових апаратів турбін. Непрямим підтвердженням такого висновку є наведений вище рис. 3, на якому видно істотну розбіжність між даними натурних випробувань і розрахунком із використанням математичної моделі, особливо в периферійній області лопатки, що призводить до необхідності ідентифікації моделі за даними натурних експериментів, кількість яких обмежена.

Можна припустити, що причиною цього є неврахування електрофізичної складової складних процесів, що відбуваються у двофазному потоці, особливо на периферії лопатки, де степінь електризації парового потоку, а отже, електрофізична дія на лопатку максимальні. Таким чином, в аспекті побудови комплексної фізичної моделі ерозійного руйнування лопаткових матеріалів парових турбін питання вивчення електрофізичної та електрохімічної його складових стає дуже актуальним. Крім того, це відкриває додаткові можливості для створення спеціальних засобів протиерозійного захисту.

З урахуванням вищесказаного комплексну фізичну модель ерозійно-корозійного руйнування лопатки можна представити у вигляді наступних компонентів:

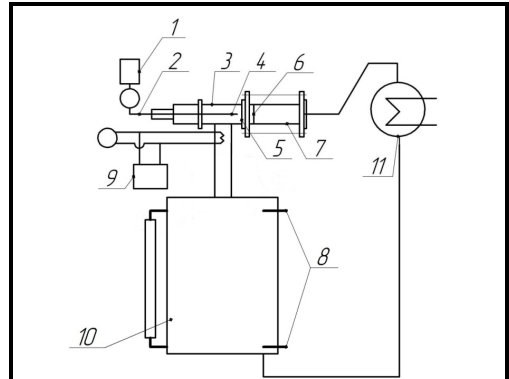
- механічне – краплеударне руйнування за рахунок структурних змін поверхні металу;
- електрофізичні – електрокорозійні процеси під впливом заряджених крапель потоку.

Перший компонент моделі розглянуто нами вище. Далі докладніше зупинимось на другому компоненті.

Передусім доречно нагадати про комплексні дослідження, проведені співробітниками ІПМаш НАН України на різних ТЕС і ТЕЦ України і США, які показали, що у процесі електризації пари щільність зарядів у потоці може досягати дуже високих значень (на порядок вище ніж у грозовій хмарі) і ці явища в основному негативно впливають на роботу вологопарових турбін: підвищується електричний потенціал ротора і збільшується ризик руйнування підшипників; електростатична генерація потоку за останнім ступенем підвищує протитиск і динамічне навантаження на робочу лопатку, знижуючи показники надійності й економічності турбін; дисоціація водяних крапель в електричному полі й електролітична дисоціація призводять до наводження конструкцій проточної частини та ін. У зв'язку з цим дуже важливими в контексті даної статті є вперше експериментально отримані результати щодо встановлення істотного впливу агресивного електризованого парового середовища на поверхневу міцність робочих лопаток.

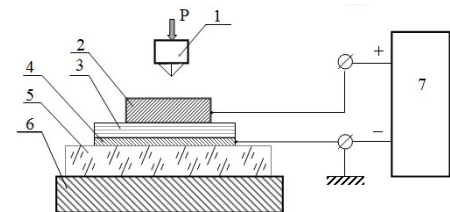
За наявності електричних явищ на заряджених поверхнях проточної частини, а також на поверхнях, що знаходяться під впливом потоку заряджених крапель, можуть протікати електрохімічні процеси, подібні до катодних і анодних в електрохімічних системах, а металеві деталі піддаватися дії негативних факторів, зокрема, катодному наводнюванню, анодному розчиненню та ін. Для проведення вищесказаних досліджень створено вологопаровий стенд із використанням штучної іонізації пари (рис. 6), а також механоелектричний стенд впливу електричних полів на металеві зразки (рис. 7). Випробування проводилися на різних термодинамічних й електричних режимах. Докладно ці дослідження наведено у роботах [10, 11].

На рис. 8–10 представлено результуючі графіки зміни мікротвердості після впливу нейтрально, позитивно і негативно зарядженої пари.



**Рис. 6. Умовна схема базових елементів парової установки з іонізацією пари коронним розрядом:**

- 1 – джерело високої напруги;
- 2 – високовольтне введення;
- 3 – іонізаційна парова камера;
- 4 – коронуючий електрод; 5 – сопло;
- 6 – модуль кріплення зразка сталі;
- 7 – камера обробки зразків; 8 – датчики рівня води; 9 – пароперегрівач;
- 10 – котел; 11 – конденсатор



**Рис. 7. Схема вимірювання мікротвердості поверхні зразка в електричному полі:**

- 1 – індентор; 2 – зразок;
- 3 – склотекстоліт; 4 – фольга;
- 5 – ізолятор; 6 – предметний стіл мікротвердоміра; 7 – джерело напруги

Проведені експерименти з впливом потоку пари на поверхню лопаткової сталі показали, що заряджене дисперсне середовище є додатковим фактором, що інтенсифікує деградацію поверхні. Експериментально, в умовах, близьких до реально існуючих термодинамічних процесів, у проточній частині турбіни було зафіксовано, що найбільший розміцнюючий (на 40–50 %) вплив на поверхню металу має позитивно заряджений потік (рис. 9). Цей ефект пояснюється специфічними умовами катодної поляризації з подальшим активним насиченням металу протонами водню.

Що стосується результатів впливу на зразок із нейтральним і негативно електризованим потоком пари, то він призводить до незначної зміни мікротвердості металу. У цьому випадку руйнація відбувається головним чином механічним шляхом. Несуттєвий вплив негативних зарядів на корозійні процеси, ймовірно, пояснюється наявністю одночасно двох взаємно компенсуючих явищ, як-от анодне електротравлення (руйнування) і збільшення поверхневої енергії за рахунок зміни щільності електронів (зміцнення).

Наявність заряджених крапель у паровому потоці виступає причиною появи об'ємного заряду, який породжує електричне поле потоку, тим самим додатково впливаючи на властивості міцності поверхневого шару лопаткового матеріалу. Останнє підтверджується дослідженнями, наведеними у роботах [12, 13], в яких відзначається ефект впливу на мікротвердість металу електричних полів – вона може зменшуватися або збільшуватися. У реальній турбіні на робочих лопатках при обдуванні електрично зарядженим вологопаровим потоком теж накопичуються заряди, що створюють електричні поля [14], які можуть бути як імпульсні високовольтні, так і низьковольтні змінні й постійні, а величина їх потенціалу залежить від внутрішнього опору ланцюга «лопатка – диск – вал – щітка, що заземлює» і може лежати в діапазоні до 10 В. При цьому важливим фактором є полярність потенціалу електричного поля, від якого залежить характер та степінь зміни поверхневої енергії металу.

Оскільки представлені вище випробування проводилися без урахування впливу електричних полів, то були здійснені спеціальні дослідження на механоелектричному стенді. Нижче наведено їх результати (рис. 11–13).

Як видно з графіків, знак відносної зміни мікротвердості поверхні зворотний полярності напруги на зразку. Це пояснюється перерозподілом поверхневої щільності електронів, а разом із нею і питомою

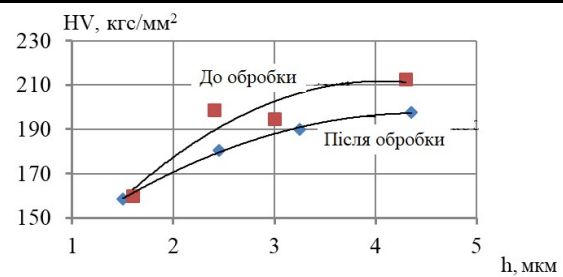


Рис. 8. Зміна мікротвердості (HV) по глибині (h) після обробки нейтральною парою

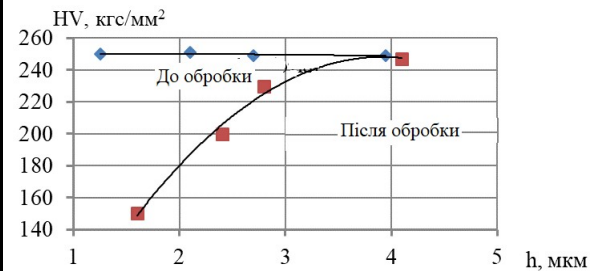


Рис. 9. Зміна мікротвердості (HV) по глибині (h) після обробки позитивно електризованою парою

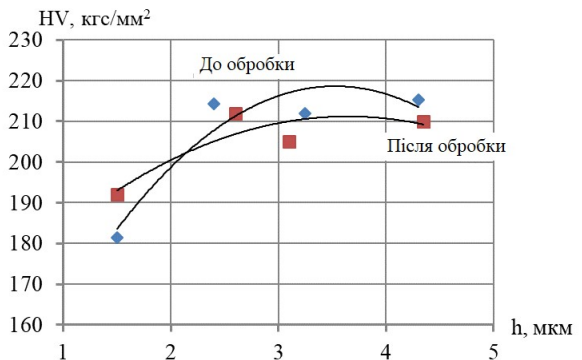


Рис. 10. Зміна мікротвердості (HV) по глибині (h) після обробки негативно електризованою парою

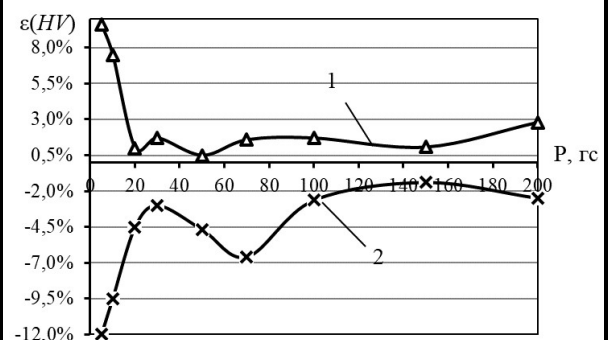


Рис. 11. Відносна зміна мікротвердості поверхні при негативній та позитивній поляризації зразка із сталі 20X13, виміряної при навантаженнях на індентор 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150 та 200 гс: 1 – напруга  $U=-10,0$  В; 2 – напруга  $U=+10,0$  В

поверхневої енергії, що призводить до зростання (або зменшення) мікротвердості поверхні зразка.

Експериментально встановлено (рис. 12), що змінні електричні поля в діапазоні від 200 до 20000 Гц значно впливають на мікротвердість поверхневого шару лопаткової сталі, що знайшло прояв у відносному зниженні мікротвердості HV 0,01 і HV 0,02 на 18–30 % і 15–18 % відповідно.

Постійне магнітне поле (рис. 13) знижує мікротвердість поверхні зразка залежно від глибини впровадження індентора на 10–30 %.

На підставі отриманих результатів щодо впливу електричних полів на мікротвердість металу можна зробити такі висновки:

- електричне поле як постійне, так і змінне, що впливає на поверхню зразка лопаткової сталі, змінює мікротвердість при пластичній деформації;
- максимальне зменшення мікротвердості в тонкому поверхневому шарі сталі під впливом електричних полів може досягати величини близько 30 %.

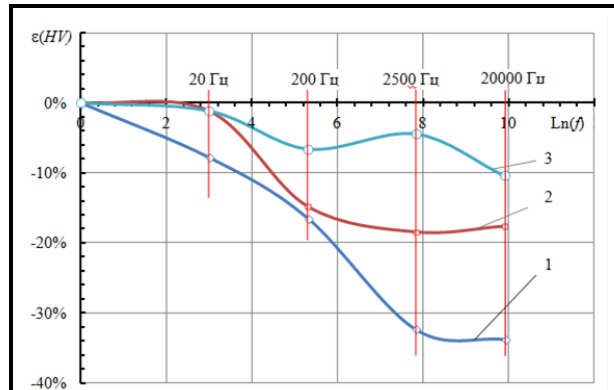
Спираючись на наведені вище результати дослідження, можна констатувати, що спільна дія заряджених крапель і електричних полів на поверхню металів може мати більш істотний руйнівний вплив (на 60–70 %), ніж у випадку з нейтральними краплями.

На поверхні робочих лопаток під дією надзвукового потоку вологої пари можуть протікати також електрохімічні процеси, подібні до електротравлення. При впливі надзвукового вологопарового потоку на метал відбувається механічне руйнування на його поверхні пасивуючої плівки оксиду хрому. При цьому поверхня металу активується і вступає у взаємодію з водою. Заряджені негативно краплі можуть не тільки чинити руйнуючий хімічний вплив на оксидну плівку, а й викликати анодну корозію металу поверхні лопатки і механічне видалення продуктів корозії. Процес пошкодження поверхні подібний до електротравлення, при цьому відбувається руйнування металу, але не інтенсивне, а значно менше, ніж вплив позитивно заряджених крапель [15].

## Висновки

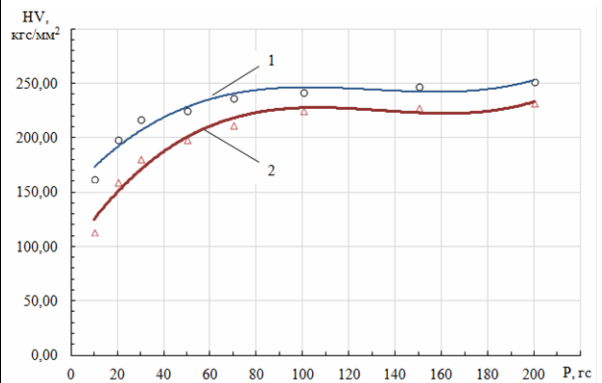
1. Розглянуто важливу й актуальну проблему створення методу прогнозування інтенсивності ерозійно-корозійного зносу матеріалу робочих лопаток ступенів циліндрів низького тиску потужних парових турбін, а також особливості побудови деяких існуючих моделей ерозії. Докладно проаналізовано розроблену в Інституті проблем машинобудування НАН України модель, засновану на детерміновано-статистичному підході до її побудови.

2. Продемонстровано можливості моделі ПММаш НАН України для прогнозування розвитку ерозійного процесу. Водночас зазначено, що розглянута модель, як і інші подібні, має складнощі в побудові, пов'язані з необхідністю її ідентифікації за даними натурних випробувань, кількість яких обмежена.



**Рис. 12.** Відносна зміна мікротвердості поверхні зразка із сталі 15X11MФ залежно від частоти змінного електричного поля напругою 10 В:

- 1 – при навантаженні на індентор 10 г ε(HV 0,01);  
2 – при навантаженні на індентор 20 г ε(HV 0,02);  
3 – при навантаженні на індентор 100 г ε(HV 0,1)



**Рис. 13.** Вплив постійного магнітного поля на зміну мікротвердості поверхні зразка зі сталі 20X13, виміряного при різних навантаженнях на індентор:

- 1 – без магнітного поля; 2 – у магнітному полі

3. Встановлено, що однією з можливих причин розбіжностей є те, що в існуючих моделях не враховується вплив на знос електрофізичних процесів, що виникають у проточній частині вологопарової турбіни при електризації вологої пари.

Акцентовано на тому, що характер і степінь зміни мікротвердості поверхні робочих лопаток вологопарових турбін залежить не тільки від втомних явищ, викликаних коливаннями поверхні металу при ударі великих крапель, а й від різних електро-фізико-хімічних процесів, що виникають при електролізації вологопарового потоку, як то:

– катодна поляризація з насиченням металу іонами водню (наводження) з наступним охрупчуванням;

– зміна енергетичного стану поверхні металу й мікротвердості під впливом електричних полів, зумовлена зміною щільності електронів,

– анодна корозія металу (процеси подібні до електротравлення).

4. З'ясовано, що такі фактори, як наявність позитивно зарядженого потоку пари, постійних і змінних електричних полів, що найчастіше реєструвалися при проведенні експериментальних досліджень на діючих турбінах ТЕС, значно (у 1,5 та більше разів) інтенсифікують ерозійно-корозійні процеси на металевих поверхнях лопаток, знижуючи тим самим їх робочий ресурс.

5. Якісні й кількісні результати досліджень процесів електризації пари залежно від параметрів потоку, водно-хімічного режиму, матеріалу лопаток та ін. можуть бути основою для формалізації електрокорозійних процесів, що відбуваються в ЦНТ вологопарових турбін, оцінки їх частки впливу в загальному ерозійно-корозійному процесі й корекції відповідних математичних моделей.

## Література

1. Шубенко А. Л., Ковальський А. Э. Каплеударная эрозия лопаточных аппаратов паровых турбин. Прогнозирование и методы защиты. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование». 2012. № 7. С. 76–87.
2. Krzyzanowski J. A. On predicting steam turbine blading erosion and turbine efficiency deterioration. ASME Proceedings Series. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Vol. 1: Turbomachinery. 1988. Paper No. 88-GT-224, V001T01A080. 9 p. <https://doi.org/10.1115/88-GT-224>.
3. Ходыкина Г. И., Сапрунов Г. И. Методика численного моделирования эрозийного износа деталей энергоустановок. *Проектирование, конструирование и прочность элементов конструкций реактивных двигателей. Сб. науч. трудов МАИ им. Серго Орджоникидзе*. 1984. С. 52–58.
4. Поддубенко В. В., Яблоник Р. М. Влияние структуры потока капель на эрозию турбинных лопаток. *Известия вузов. Энергетика*. 1976. № 4. С. 88–93.
5. Ruml Z., Liska A. A model for the erosion of steam turbine blade materials. Proceedings of 7th Scientific Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, England, Cambridge, University of Cambridge, September 13–15, 1987. U.K., England, Cambridge: University of Cambridge Publ., 1987. Paper 15. P. 1–8.
6. Спринджер Дж. С. Эрозия при воздействии капель жидкости. Москва: Машиностроение, 1981. 200 с.
7. Тищенко В. А., Алексеев Р. А., Гаврилов И. Ю. Модель движения эрозийно-опасных капель в межлопаточных каналах паровых турбин. *Теплоэнергетика*. 2018. № 12. С. 35–44.
8. Шубенко А. Л., Ковальський А. Э. Кинетическая модель каплеударной эрозии рабочих лопаточных аппаратов паровых турбин. *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1989. № 5. С. 94–101.
9. Krzyzanowski J. A., Kovalsky A. E., Shubenko A. L. Some aspects of erosion predicting of steam turbine blading. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1994. Vol. 116. Iss. 2. P. 442–451. <https://doi.org/10.1115/1.2906841>.
10. Тарелин А. А. Теплоэлектрофизические процессы в паровых турбинах. Харьков: ФЛП Иванченко И. С., 2020. 184 с.
11. Tarelin A. O., Surdu N. V., Nechaev A. V. The influence of wet-steam flow electrization on the surface strength of turbine blade materials. *Thermal Engineering*. 2020. Vol. 67. Iss. 1. P. 60–67. <https://doi.org/10.1134/S0040601520010073>.
12. Орлова Д. В., Филиппев Р. А., Данилов В. И. О возможных причинах влияния электрического потенциала на сопротивление металлов микроиндентированию. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2012. Т. 55. № 10. С. 66–67. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-10-66-67>.
13. Орлова Д. В., Данилов В. И., Зуев Л. Б., Колесник А. С., Дульбеева О. Н. О влиянии электростатического поля на микротвердость монокристаллов цинка. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2012. № 4. С. 98–102.



14. Tarelin A. A. Postfact phenomena of the wet-steam flow electrization in turbines. *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64. Iss. 11. P. 810–816. <https://doi.org/10.1134/S004060151711009X>.
15. Tarelin A. O., Shvetsov V. L., Mykhailenko V. H., Nechaiev A. V., Khinievich O. Ye. Electrochemical and chemical mechanisms of the erosion-corrosion process of wet-steam turbine rotor blades destruction under the influence of electrified moisture. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2021. Vol. 24. No. 1. P. 53–58. <https://doi.org/10.15407/pmach2021.01.053>.

*Надійшла до редакції 12.12.2022*