

## ПІДХОДИ ДО ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЯВУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНИХ ПОКРИТТІВ У ВУЗЛАХ ГТУ

<sup>1</sup>Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Дніпровський державний технічний університет, Каменське, Україна

**Вступ.** Безпека, надійність та економічність технічного використання газотурбінних установок (ГТУ) визначається низкою факторів впливу. Одним з них є збереження оптимального зазору між деталями вузлів, які мають контури з використанням широкого спектру покриттів-ушільнювачів. До таких вузлів відносяться: «торець лопатки – корпус турбіни, компресора», лабиринтне ушільнення турбіни. Відомі технічні рішення щодо підтримки радіальних зазорів на мінімальному рівні шляхом застосування активних систем керування дозволяють знизити їх величину на всіх режимах роботи ГТУ. Перспективним шляхом вирішення зазначеної задачі є використання ушільнювальних припрацьовувальних покриттів нового покоління. Їх основною особливістю є низька твердість на етапі припрацювання, що дає можливість безпечного врізання торця лопатки або гребінців лабиринтного ушільнення та забезпечення мінімального радіального зазору. Після етапу припрацювання твердість перспективного покриття, що розробляється, збільшується за рахунок прогнозованих структурно-фазових перетворень, що забезпечує наступну високу стійкість до ерозії та газообразивного зношування. Виявлення таких механічних властивостей передбачається на етапах проведення експериментальних досліджень, для яких потрібне відповідне випробувальне лабораторне обладнання. Удосконалення існуючого устаткування з цією метою безумовно актуальне під час вирішення завдань трибологічного забезпечення таких досліджень. При цьому прояв службових властивостей згаданих покриттів має бути пов'язаний із можливістю відтворення умов їхньої роботи на деталях ГТУ.

**Метою роботи** є аналіз існуючих розробок випробувального обладнання для моделювання процесів контактної взаємодії між деталями газотурбінних установок в умовах, наближених до експлуатаційних. Запропоновані технічні рішення дозволять визначитися із повнотою імітування зміни силового, швидкісного та температурного навантаження об'ємів матеріалів деталей, у тому числі і покриттів, на етапах відповідних експериментальних досліджень.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій** по розглянутому питанню. Фізичне моделювання процесу врізання пластинчастого зразка в тіло досліджуваного матеріалу застосовано авторами у роботах [1-3]. При цьому використана класична схема тертя «нерухома колодка з досліджуванним покриттям – диск, що обертається, з інструментом руйнування». Дослідниками використовувалася високошвидкісна випробувальна установка для тертя, яка імітувала умови роботи кількох ушільнень. Основний акцент робився на встановлення закономірностей зношування покриттів у широкому діапазоні зміни швидкостей ковзання диска з лезами (від 30 до 150 м/с) при керованих значеннях врізання у матеріал покриттів – до 400 мкм. Однак фактори керування силою врізання при заданій швидкості ковзання і температурного стану середовища фрикційної взаємодії не враховувалися. Обладнання дозволяло тільки вимірювати поточні значення нормальної, дотичної контактної сили і температури в зоні тертя. Застосування подібної схеми, умов і режимів взаємодії зразків для оцінки, наприклад, жароміцних покриттів, що приробляються, не є повною мірою прийнятним, оскільки моделюється тільки окремо взятий режим роботи ГТУ.

Методика оцінки зносостійкості покриттів, яка описана в статті [4], зводиться до вимірювання втрати маси зразків-імітаторів статора при моделюванні суцільної ударної взаємодії зі зразками-імітаторами пластин, які закріплюються на диску, що обертається. При цьому середньостатистичний шлях тертя при чирканні-співударі становить  $l = 0,015$  м і не контролюється сила притискання при взаємодії. Більш того, миттєва контактна взаємодія представляється розподіленою по площі торкання, що зумовлює її патологічне поверхневе руйнування (дряпання, вигладжування) і не створює передумов для оцінки зношування за глибиною. Останнє важливе для оцінки прояву міцності когезійних зв'язків між структурними компонентами покриття, оскільки нормальні тиски при таких зсувних деформаціях малі. Інакше б проявляв себе зрив кріплення пластин. Також середовище взаємодії відкрите, що не передбачає збирання та обробку інформації про продукти зношування та їх зв'язок зі станом приповерхнево-об'ємних структур, що формуються. Останні просто неможливо зібрати. Таке моделювання не передбачає наявності замкнутої взаємодії покриття з пластиною, яка розподілена по внутрішньому циліндричному периметру, наприклад, корпусу відсіку ГТУ, з урахуванням неконтрольованої контактної взаємодії. Тобто, за допомогою наведеного обладнання відтворюється примусове торкання з покриттям без урахування прояву розподілу його властивостей по циліндричному контуру статора силової (компресорної) турбіни відповідно до технології нанесення.

У роботі [5] закладено основи методологічного забезпечення досліджень механічних властивостей припрацьовувальних покриттів, заснованих на фізичному моделюванні процесу врізування гребінців рухомої частини ущільнювального контуру в тіло покриття, сформованого на нерухомій частині. При цьому запропоновано методику оцінки жароміцних припрацьовувальних покриттів у температурних умовах  $25 - 35^\circ\text{C}$  при відносно малому швидкісному режимі взаємодії досліджуваних зразків  $n = 300$  хв<sup>-1</sup>. Параметрами оцінки властивостей покриттів виступали динамічний коефіцієнт тертя, енергетична інтенсивність зношування матеріалів покриття за масою. При цьому основний акцент триботехнічних випробувань ставився на визначенні тенденцій прояву опору врізання зубців на диску, що обертається, у випробуваній матеріал при автоматичному розвантаженні контакту. В результаті таких випробувань було встановлено підвищену сипкість та крихкість досліджуваних матеріалів, що не давало можливості розширити діапазон навантажень. Покриття дуже швидко зношувалися, і зубці дисків доходили до основи колодки. При цьому була відсутня можливість повторного використання колодок у вигляді пластин з напиленням матеріалом, оскільки при імітуванні структурно-фазових перетворень при нагріванні до  $1100^\circ\text{C}$  відбувалося відшаровування покриття від колодок. Загалом у методиці випробувань оцінка контактної взаємодії за умов безперервного розігріву середовища взаємодії не передбачалася, що було істотним недоліком.

У роботі [6] авторами запропоновано методику досліджень з використанням випробувальної камери, яку монтували відносно випробуваних зразків. Фрикційний контакт моделювався між рухомим зразком – диском із зубцями на його зовнішній поверхні та нерухою малогабаритною колодкою, на поверхні якої формувалося досліджуване покриття (рисунок 1). При цьому визначалися фрикційні характеристики контакту за динамічним коефіцієнтом тертя та зношування матеріалу покриття за втратою маси. Дослідження мали такі обмеження:

- неможливість імітування різкого збільшення швидкісного режиму взаємодії, оскільки машина тертя СМЦ-2, на якій проводилися випробування, не дозволяла виконувати цю операцію без переривання досліду;

- неможливість створення плавного силового навантаження, оскільки зубці стрімко врізалися своєю основою в тіло покриттів;

- обмежена можливість повторного використання зразків після примусової термічної обробки для забезпечення прогнозованих структурно-фазових перетворень, оскільки у 50–60% зразків відбувалося відшаровування покриттів від підкладки колодок.

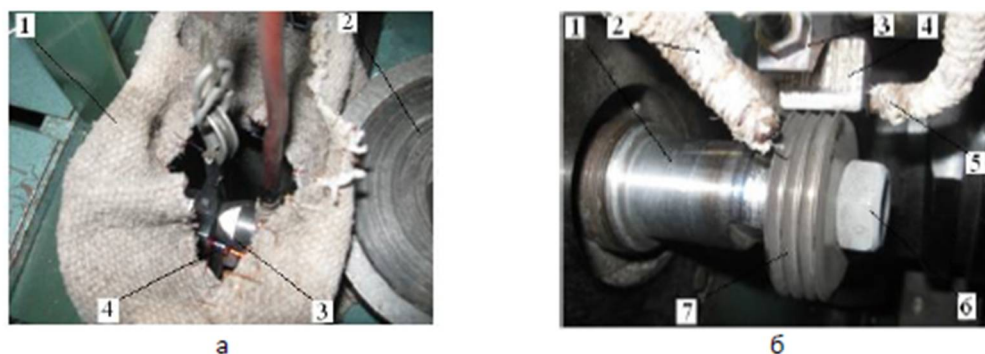


Рис. 1. Обладнання машини тертя СМЦ-2 для триботехнічних випробувань малогабаритних зразків у жаровій камері: а – фрагмент корпусу камери, обгорнутий азбестовим полотном: 1 – полотно; 2 – вантаж; 3 – верхній вал машини; 4 – зразок-колодка з покриттям; б – контакт зразків диска з колодкою: 1 – нижній вал машини; 2 – кожух термопар; 3 – тримач; 4 – зразок-колодка з покриттям; 5 – кожух термопар; 6 – гайка фіксації; 7 – зразок-диск із гребінцями

В основу подальшого розвитку фізичного моделювання досліджуваного процесу тертя покладено уявлення про існування подібних за механічною взаємодією фізичних явищ у натурному газотурбінному двигуні, зокрема між гребінцями торців лопаток і покриттям корпусу силової турбіни (і, можливо, компресорного відсіку) газодинамічної випробувальної камери (рисунок 2). У цій камері гребінці вільно посаджених у роторі пластин механічно взаємодіють із внутрішньою циліндричною поверхнею матеріалу кільця [7]. Такий підхід, на нашу думку, максимально наближує моделювання до реальних умов термомеханічного навантаження дослідних покриттів.

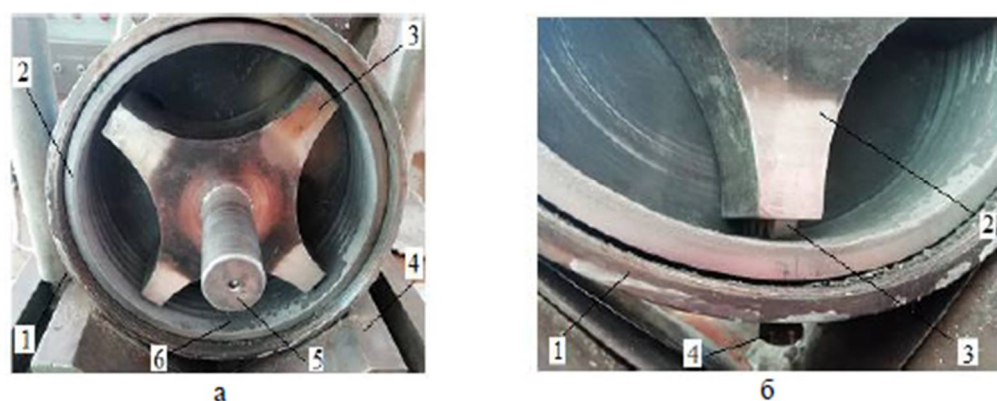


Рис. 2. Випробувальна камера:  
а – загальний вигляд без передньої кришки: 1 – корпус камери; 2 – зразок-кільце; 3 – ротор; 4 – опорна станина стенду; 5 – вал підшипника ротора; 6 – продукти зношування покриття; б – крило ротора з пластиною: 1 – зразок-кільце; 2 – корпус крила ротора з внутрішнім пазом; 3 – пластина з гребінцями; 4 – нижній гвинт фіксації зразка-кільця

Для виконання фізичного моделювання запропоновано використовувати таке обладнання:

– стенд для випробування генераторних установок Нирadastechniki Gepgyara U-808 серія № 326 автомобільних двигунів кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка».

Стенд має два режими керування зміною частоти обертання приводного валу: 300–2500  $\text{хв}^{-1}$  та 2500–5000  $\text{хв}^{-1}$  (рисунок 3). Завдяки наявності перемикачів частотних режимів можливо швидко збільшувати частоту обертання приводного валу в два рази, наприклад, з 500  $\text{хв}^{-1}$  до 1000  $\text{хв}^{-1}$ , з 800  $\text{хв}^{-1}$  до 1600  $\text{хв}^{-1}$  тощо. Це створює умови для моделювання миттєвого вривання зубців пластин у матеріал покриття і збільшення притисної сили, зокрема при фіксованих температурах середовища взаємодії.

На станину стенда для закріплення генератора замість генератора встановлюється випробувальна камера з ротором, в якій розміщуються:

- зразок-кільце з покриттям, яке наноситься на внутрішню циліндричну поверхню;
- ротор із рухомими пластинами з зубцями;
- мультиметри DT-838 з термопарою TP-01 – 2 од.;
- термоізоляція.

Для створення температури середовища взаємодії покриття із зубцями пластин використовується промисловий газ ізобутан-бутан у товарних балончиках із пальником.

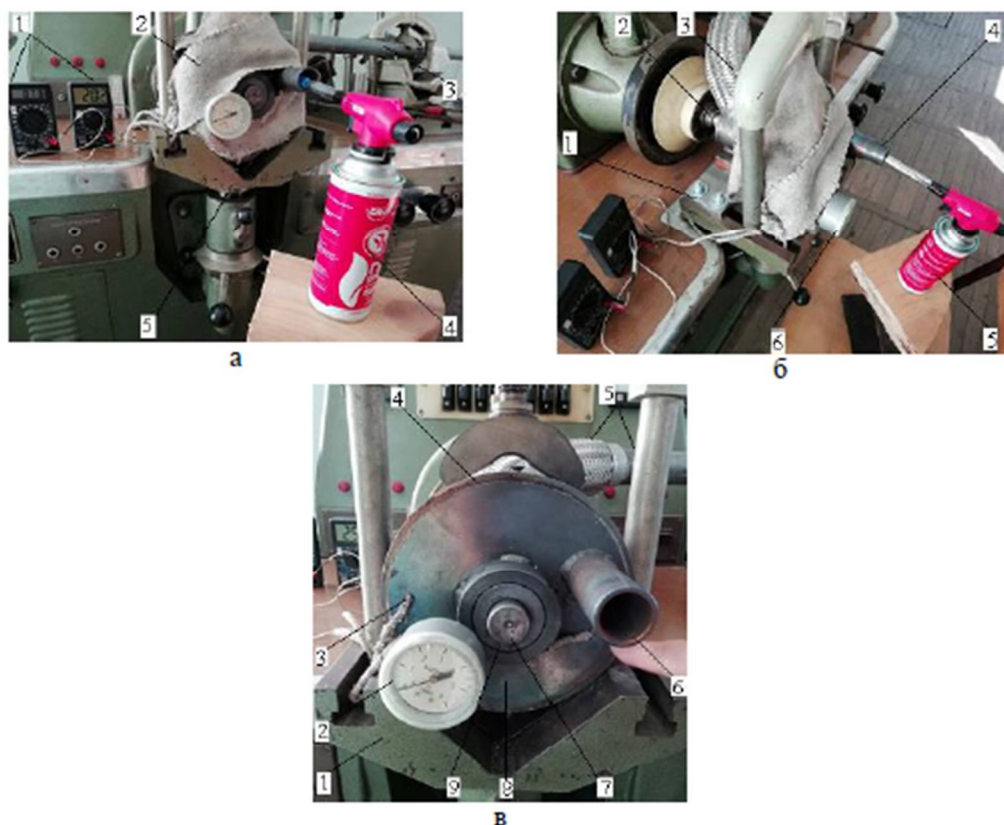


Рис. 3. Установка для випробувань:

- а – вигляд спереду; 1 – мультиметри; 2 – ізоляція; 3 – вивідна труба; 4 – балон із ізобутаном-бутаном; 5 – станина стенду; б – вид зверху: 1 – бічні опори корпусу камери; 2 – вал ротора; 3 – випускна гофра; 4 – впускний патрубок; 5 – балон із ізобутаном-бутаном; 6 – манометр; в – камера без ізоляції: 1 – станина стенду; 2 – манометр; 3 – провід термопар; 4 – корпус камери; 5 – гофра із випускною трубою; 6 – впускний патрубок; 7 – вал ротора; 8 – кришка камери; 9 – підшипник валу

**Висновки.** Виконаний аналіз підходів до фізичного моделювання тепломеханічного навантаження поверхонь деталей ГТУ, зокрема з досліджуваними жароміцними припрацьовувальними покриттями, показав повноту врахування дослідниками особливостей

їхньої контактної взаємодії. Кожне з наведених лабораторних устаткувань безумовно значуще та має сенс для відповідних експериментальних досліджень, а їх вибір визначається авторами.

Наприклад, з використанням випробувальної камери вже виконано фізичне моделювання тепломеханічного навантаження покриттів системи КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y з вмістом ітрію 0,1% [7], сформованих на внутрішніх циліндричних поверхнях зразків-кільць двома технологіями – газополуменевим та іоноплазмовим напыленням. Визначено тенденції зміни параметрів їх зношування, зумовлених неоднаковим проявом фізико-механічних властивостей. При цьому окремо відтворювалися можливі етапи контактної взаємодії поверхонь статора з покриттями та лопатками ГТУ, які були розгорнуті в часі й прогнозовано характерні для їхніх експлуатаційних умов роботи.

#### Список використаних джерел

1. N. Fois, M. Watson and M.B. Marshall. The influence of material properties on the wear of abrasible materials. *Journal of Engineering Tribology*. June 5, 2016. Volume 231, Issue 2.

2. Siyang GAO, Weihai XUE, Deli DUAN, Shu Li. Tribological behaviors of turbofan seal couples from friction heat perspective under high-speed rubbing condition/*Friction* 4(2): 176–190 (2016).

3. Stringer J and Marshall MB. High speed wear testing of an abrasible coating. *Wear* 2012; 294–295: 257–263.

4. Красников А.О., Торба Ю.И., Занин А.Е., Клирик Р.Р. Проверка износостойких и прирабатываемых покрытий. *Вестник двигателестроения*. № 2. 2018. С.179–185.

5. Boguslaev, V.O., Gresha, V.L., Tkach, D.V., Likhovitsker, Z.V., Klymov, O.V. Evaluation of the Tribotechnical Characteristics of Thermo-Barrier Sealing Coatings under Critical Loads/*Journal of Friction and Wear*, 2019, 40(1), P. 80–87.

6. Boguslaev, V.O., Gresha, V.L., Kubich, V.I., Fasol, Ye.O., Likhovitsker, V.O. Effect of alloying heat-resistant packing coatings on their tribotechnical, physical and mechanical properties/*Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, (6), P. 41–47.

7. Kubich, V.I, Pavlenko, D.V., Fasol Y.O., Syvachuk, O.V. Comparison of High-Temperature Wear Resistance of Gas-Flame and Ion-Plasma Sealing Coatings with 0.1% Yttrium. *Tribology in Industry*. Vol. 46, No. 3 (2024), P. 486–498.