

УДК 620.197.5:669.788

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ ДЕФОРМАЦІЙ ЛОПАТКИ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ ЗА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ

CHENGAO BAO¹, Т. В. ГЕМБАРА², В. М. ФІРМАН³

¹ China University of Geosciences, Wuhan;

² Львівський державний університет безпеки життєдіяльності;

³ Львівський національний університет імені Івана Франка

У роботі подано результати комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану фрагмента лопатки парової турбіни з корозійностійкої сталі 08Cr18Ni10Ti за умов високотемпературного та довготривалого статичного навантаження. Аналіз виконано методом скінченних елементів у програмному середовищі ANSYS на основі тривимірної моделі, що відтворює реальну геометрію робочої частини лопатки. Визначено розподіли еквівалентних напружень і деформацій повзучості в часі та проаналізовано вплив температури й тиску пари на інтенсивність повзучості. Показано, що максимальні деформації повзучості локалізуються в кореневій зоні лопатки, де концентрується енергія пружної деформації. Для підвищення точності прогнозування отримані результати було додатково проаналізовано із застосуванням регресійних методів машинного навчання, що дало змогу уточнити вплив основних параметрів на інтенсивність повзучості та оцінити довготривалу працездатність елементів турбомашин.

Ключові слова: *парова турбіна, безпека експлуатації, повзучість, метод скінченних елементів, високотемпературна деформація, регресійний аналіз, довговічність.*

The paper presents the results of computer modeling of the stress–strain state of a fragment of a steam turbine blade made of corrosion-resistant steel 08Cr18Ni10Ti under conditions of high-temperature and long-term static loading. The analysis was carried out using the finite element method in the ANSYS software environment based on a three-dimensional model that reproduces the real geometry of the working part of the blade. The distributions of equivalent stresses and time-dependent creep strains were determined, and the influence of temperature and steam pressure on the creep intensity was analyzed. It was shown that the maximum creep strains are localized in the root region of the blade, where elastic strain energy is concentrated. To improve the accuracy of prediction, the obtained results were additionally analyzed using regression-based machine learning methods, which made it possible to clarify the influence of the main parameters on creep intensity and to assess the long-term serviceability of turbomachinery components.

Keywords: *steam turbine operational safety, creep, finite element method, high-temperature deformation, regression analysis, durability.*

Вступ. Сучасні парові турбіни експлуатуються в умовах високих температур, дії значних механічних навантажень і складних термогідродинамічних процесів. За таких умов ключову роль у довготривалій надійності лопаток відіграє повзучість – повільна, але незворотна пластична деформація матеріалу, що розвивається під дією сталого напруження за підвищених температур. Вона визначає не лише ресурс окремих елементів турбіни, але й загальну безпеку енергетичної установки, оскільки накопичення деформацій у лопатках може спричинити зміну аеродинамічного профілю,

зниження коефіцієнтів корисної дії, розбалансування ротора, а в крайніх випадках – аварійне руйнування з ризиком масштабних техногенних наслідків.

Дослідження повзучості матеріалів високотемпературних елементів турбомашин протягом останніх десятиліть активно розвивалися у рамках класичних і сучасних моделей деформаційної та пошкоджувальної механіки.

Модель Нортон–Бейлі [1,2] є однією з найпоширеніших описових моделей повзучості, у якій швидкість деформацій задається степеневу залежністю від напруження та температури. Застосування моделі Нортон–Бейлі у даній роботі обумовлене тим, що вона ефективно описує вторинну стадію повзучості за умов сталих напружень і підвищених температур, характерних для експлуатації робочих лопаток парових турбін. Для сталі 08Cr18Ni10Ti в діапазоні температур 820–900 К та часових інтервалів до кількох тисяч годин дана модель широко використовується в інженерних оцінках довговічності. Слід зазначити, що модель не враховує безпосередньо механізми руйнування та третинну стадію повзучості, тому отримані результати інтерпретуються як оцінка накопичення деформацій і тенденцій до втрати працездатності. Вона дозволяє ефективно відтворювати стадію стабільної (вторинної) повзучості та широко використовується у інженерних оцінках ресурсу лопаток, труб і дисків турбін.

Підхід Леметре [3-5] розширює класичну механіку деформацій у сторону континуальної теорії пошкодження (CDM). Він вводить скалярний параметр пошкодження, що зменшує ефективну площу перерізу, дозволяючи моделювати деградацію матеріалу в процесі повзучості й передбачати момент ініціації макротріщин.

Модель Качанова–Роботнова [6,7] є фундаментальною для опису тривалої повзучої руйнування. Вона включає рівняння еволюції пошкодження, які характеризують зародження й ріст мікропорожнин та мікротріщин у матеріалі, і добре узгоджується з експериментами щодо повної кривої повзучості – від первинної до стадії руйнування.

У сучасних роботах [8–20] запропоновано низку моделей, що поєднують деформаційні та енергетичні критерії. Акцент робиться на локальній енергетиці повзучості, розподілі дисипації енергії та умовах ініціації пошкодження у високотемпературних сталях, що важливо для робочих лопаток турбін зі складною геометрією. Ці підходи стали основою розвитку чисельних алгоритмів у комп'ютерній механіці та були адаптовані до нелінійних задач тепломеханіки для опису повзучості за змінної температури й складного напруженого стану.

Одним із найбільш ефективних інструментів є скінченно-елементне моделювання, яке дозволяє відтворити геометрію лопатки, задати складні граничні умови та врахувати нелінійну поведінку матеріалу за високих температур. Тривимірні моделі в ANSYS забезпечують деталізований аналіз еквівалентних напружень, швидкостей деформацій повзучості та зон потенційної локалізації пошкодження. Для підвищення точності прогнозування доцільним є також застосування регресійних методів машинного навчання для встановлення залежностей між навантаженням, температурою та інтенсивністю повзучих деформацій і побудови предиктивних моделей ресурсу.

Коректне прогнозування повзучості є критично важливим для безпеки парових турбін, оскільки деградація лопаток може призводити до їх відриву, порушення балансу ротора та аварійних руйнувань. Таким чином, метою даної роботи є дослідження поведінки фрагмента робочої лопатки парової турбіни зі сталі 08Cr18Ni10Ti за умов довготривалого високотемпературного навантаження на основі тривимірного скінченно-елементного моделювання та регресійного аналізу результатів.

Формулювання задачі включає опис геометричної моделі фрагмента лопатки, умов закріплення, температурного поля, силового навантаження, механічних властивостей матеріалу та часових параметрів чисельного розрахунку. У дослідженні розглянуто фрагмент робочої частини лопатки парової турбіни (рис.1), геометрія якої відтворює реальний аеродинамічний профіль з урахуванням зміни товщини перерізу вздовж висоти, кривини спинки й корита, а також локальних радіусів переходу в кореневу зону. Для чисельних розрахунків було виділено ділянку, що включає:

- частину пера лопатки, де відбуваються максимальні термомеханічні деформації;
- перехідний радіус, який є потенційно небезпечною зоною концентрації напружень;
- верхню частину кореневої ділянки, яка передає навантаження на диск ротора.

Таке представлення дає змогу врахувати реальні особливості напружено-деформованого стану і забезпечує достатню точність при прогнозуванні поведінки елемента за умов довготривалого статичного навантаження та дії високої температури.

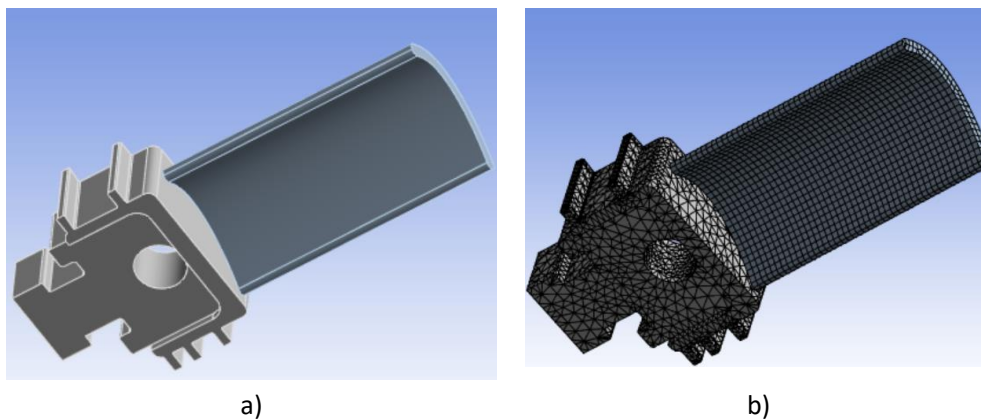


Рис. 1. Фрагмент робочої частини лопатки парової турбіни, використаний у чисельному моделюванні (а) та його розбиття на скінченні елементи (b).

Fig. 1. Fragment of the working part of a steam turbine blade used in numerical modeling (a) and its finite element discretization (b).

У розрахунку враховано два типи зовнішніх впливів: тепловий та силовий. Температурне поле задавалося відповідно до режимів роботи турбіни. Середня температура пари, що омиває поверхню лопатки, приймалася у діапазоні 820–900 К, залежно від висоти профілю. На ребрі та кореневій ділянці враховано знижений тепловий вплив через інтенсивніший тепловідвід. Для забезпечення коректності моделювання було використано стаціонарний розподіл температур, визначений попереднім тепловим аналізом. Силовий вплив створювався:

- тиском пари на поверхню корита, що моделювався у вигляді розподіленого навантаження з інтенсивністю до 0.8–1.2 МПа залежно від значення тиску у ступені;
- центробіжними силами, що виникають під час обертання ротора. Для спрощення аналізу вони були еквівалентно змодельовані як масові сили, пропорційні кутовій швидкості.

Коренева частина фрагмента моделі задавалася умовно закріпленою шляхом заборони поступальних переміщень, що відтворює жорсткий контакт пера з диском ротора та виключає можливість руху моделі як твердого тіла.

Механічні та температурні властивості матеріалу. Матеріалом лопатки є аустенітна корозійностійка сталь 08Cr18Ni10Ti. Для чисельного аналізу використано наступні властивості: модуль пружності $E(T)$ - залежний від температури, у діапазоні 160–190 ГПа при $T = 800–900$ К; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.30$; густина $\rho = 7800$ кг/м³; коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha(T) \approx (16–18) \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; параметри степеневі моделі повзучості Нортон–Бейлі:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

де A , n , Q визначені на основі довідкових даних та доступних експериментальних залежностей для сталей аустенітного класу.

Методика чисельного моделювання (FEM). Геометрична модель створена у модулі ANSYS DesignModeler шляхом параметричного відтворення профілю пера та кореневої частини з використанням опису реальних конструктивних елементів. Було виконано: побудову криволінійних поверхонь пера; параметричну реконструкцію товщини на різних висотах; формування перехідних радіусів та фрагмента кореневої частини; імпорт температурного поля з попереднього теплового аналізу.

Для моделювання використано твердотільні елементи SOLID186 (параметричні 20-вузлові елементи), які забезпечують високу точність у задачах термомеханіки та повзучості. Для перевірки чутливості до типу елемента були протестовані також SOLID187 з тетрадральною структурою.

Сітка згущена в областях очікуваної концентрації напружень – у кореневій ділянці та на внутрішньому радіусі. Загальна кількість елементів становила 36618, що забезпечувало збалансоване співвідношення точності та обчислювальних витрат.

Збіжність чисельної моделі перевірялася шляхом варіювання густини скінченно-елементної сітки та кроку інтегрування за часом. Критерієм збіжності вважалося зменшення змін максимальних напружень і деформацій повзучості до рівня менше 3 %, що забезпечує достовірність отриманих результатів.

Модель повзучості та часові параметри. Повзучість моделювалася у нестационарному режимі з використанням степеневі моделі Нортон–Бейлі, що дозволяє коректно описувати вторинну стадію деформацій. Тимчасовий інтервал розрахунку становив 1000–5000 год, залежно від температури та рівня напружень. Часова дискретизація – адаптивна, з автоматичним уточненням кроку при зростанні швидкості повзучості.

Для перевірки моделі виконано тестовий розрахунок за умов сталої температури і напруження, що підтвердило коректність реалізації матеріальних параметрів.

Збіжність моделі перевірялася шляхом: сіткової адаптації – зміна густини сітки з аналізом впливу на величини максимальних еквівалентних напружень і деформацій повзучості; аналізу кроку інтегрування за часом – порівняння результатів при різних режимах адаптивного кроку; перевірки фізичної коректності – оцінка співвідношення між напруженнями, температурою і швидкістю деформацій.

Критерієм збіжності обрано зменшення зміни ключових параметрів (σ_{\max} , $\varepsilon_{cr,\max}$) до рівня менше 3 % при подальшому згущенні сітки або зменшенні кроку інтегрування.

Результати моделювання. Розрахунок напружено-деформованого стану показав (рис.2), що максимальні еквівалентні напруження за Мізесом виникають у ділянках, де різко змінюється геометрія профілю, зокрема на внутрішньому радіусі переходу від пера до кореневої частини. У середній частині пера напруження мають плавний розподіл, що відповідає характеру розподіленого тиску пари. Значення напружень у верхній ділянці пера є нижчими за рахунок зменшеного перерізу та кращого охолодження.

Максимальне значення напружень досягає рівня, близького до умовного порогу активації повзучості для сталі 08Cr18Ni10Ti за робочих температур, що підтверджує необхідність врахування нелінійної поведінки матеріалу в довготривалих розрахунках.

Деформації повзучості найбільш інтенсивно розвиваються у кореневій частині лопатки, де спостерігаються: підвищені локальні напруження; збільшений температурний градієнт; концентрація маси, що передає центробіжні сили. Отримані результати свідчать, що коренева частина лопатки є зоною локальної концентрації енергії. Саме в цих областях формується поєднання високих напружень і температури, що зумовлює інтенсивніше накопичення повзучих деформацій. Така локалізація енергії створює передумови для прискореного розвитку мікропошкоджень і визначає кореневу зону як критичну з точки зору довговічності лопатки.

У пері лопатки деформації повзучості розподілені нерівномірно: вони зростають у напрямку до кореня і зменшуються в тонкій периферійній зоні. Модель Нортон–Бейлі підтвердила формування стадії стабільної повзучості протягом більшої частини розрахункового інтервалу.

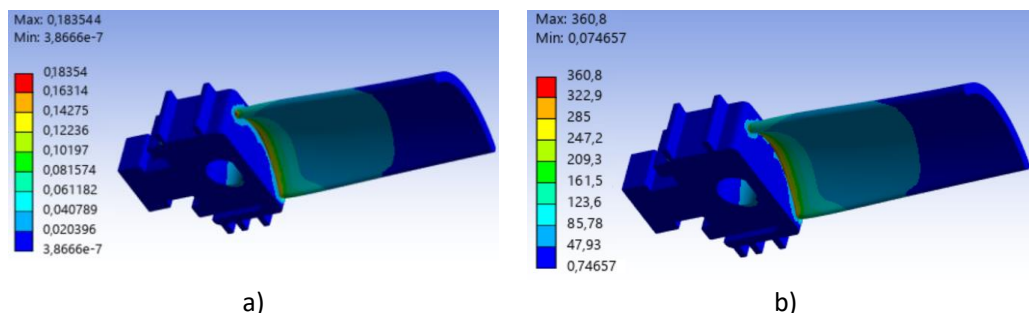


Рис. 2. Поле еквівалентних деформацій (а) та напружень за Мізесом (б) у фрагменті лопатки за спільної дії температурного поля, тиску пари та центробіжних сил;

Fig. 2. Equivalent strain field (a) and von Mises stress field (b) in the blade fragment under the combined action of the temperature field, steam pressure, and centrifugal forces.

Розрахунки (рис.3) також показали, що на початкових етапах (до ~100 год) пошкодження розвивається повільно, що відповідає первинній стадії повзучості. Надалі спостерігається поступове прискорення накопичення деформацій, зумовлене зростанням пластичних деформацій у зонах пік-напружень. За часових інтервалів понад 2000 год з'являється виражена тенденція до локалізації пошкодження, що є характерною ознакою переходу до третинної (руйнівної) стадії повзучості.

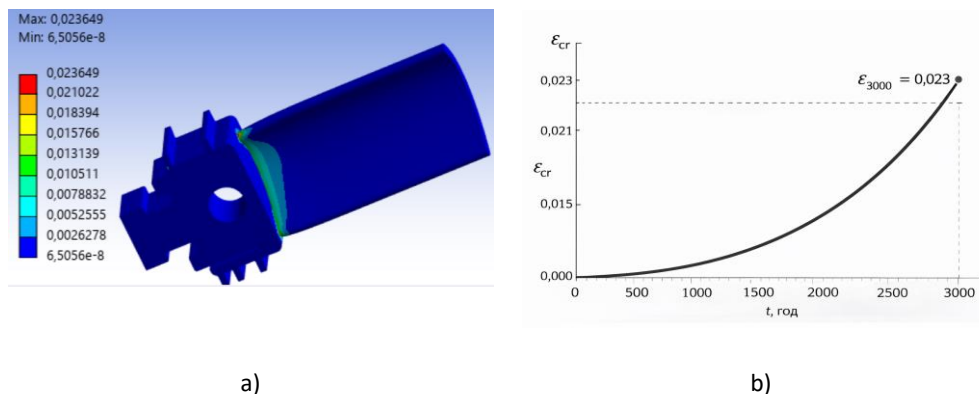


Рис. 3. Розподіл еквівалентної деформації повзучості у фрагменті лопатки (а) та часова залежність максимальної еквівалентної деформації повзучості ϵ_{cr}^{max} у інтервалі 0–3000 год (б).

Fig. 3. Distribution of equivalent creep strain in the blade fragment (a) and time dependence of the maximum equivalent creep strain over the interval 0–3000 h (b).

Коренева частина є найбільш чутливою зоною до високотемпературної деформації. У дослідженні встановлено: максимальні напруження концентруються біля внутрішнього радіуса паза; градієнт температури сприяє асиметричному розподілу деформацій повзучості; локальне накопичення енергії пружної деформації корелює з областями прискореного розвитку пошкодження.

У межах даного дослідження критичний стан лопатки пов'язується з досягненням максимальних еквівалентних деформацій повзучості в кореневій зоні та зі зростанням швидкості їх накопичення у часі. Саме ці показники розглядаються як індикатори переходу до прискореної стадії повзучості та потенційної втрати працездатності елемента.

Регресійний підхід для уточнення впливу температури й тиску. Для узагальнення результатів скінченно-елементного моделювання застосовано регресійний аналіз на основі степеневих та експоненційних залежностей між температурою, тиском пари та максимальною еквівалентною деформацією повзучості. Вхідними параметрами моделі були температура та навантаження, а вихідним параметром — максимальна еквівалентна деформація повзучості, визначена за результатами МСЕ-розрахунків.

Для деталізації взаємозв'язку між параметрами навантаження було виконано додаткову регресійну обробку результатів МСЕ. Аналіз показав, що зростання температури впливає на швидкість повзучості експоненційно, тоді як тиск пари має переважно степеневий характер впливу, відповідно до матеріальних параметрів моделі Нортона.

Отримані апроксимаційні залежності можуть бути використані для прогнозування поведінки лопатки при змінних експлуатаційних режимах без необхідності виконання повномасштабних МСЕ-розрахунків. Якість апроксимації оцінювалася за коефіцієнтом детермінації R^2 , значення якого перевищувало 0.9, що свідчить про задовільну узгодженість регресійної моделі з чисельними даними в межах розглянутого діапазону параметрів.

Вплив локальної концентрації енергії на довговічність. Виявлено, що локальна енергія пружної деформації у кореневій частині є ключовим фактором, який визначає місце і час початку прискореної стадії повзучого руйнування. Зростання локальної енергії призводить до більш інтенсивного розвитку

мікропор і мікротріщин, що узгоджується з енергетичними критеріями пошкодження [9, 11–16]. Таким чином, контроль та оптимізація геометрії кореневої частини є одним із найефективніших шляхів підвищення ресурсу та безпеки турбінних лопаток.

ВИСНОВКИ. Внаслідок комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану фрагмента лопатки парової турбіни з корозійностійкої сталі 08Cr18Ni10Ti за умов високотемпературного та довготривалого статичного навантаження встановлено, що максимальні напруження та деформації повзучості локалізуються у кореневій частині лопатки, що визначає її як критичну зону. Швидкість розвитку повзучості суттєво залежить від температури та прикладеного тиску пари. Часовий розвиток пошкодження відповідає класичним стадіям повзучості та демонструє перехід до локального прискореного руйнування.

Використання регресійних моделей дозволяє узагальнити результати МСЕ та уточнити залежності між параметрами навантаження.

МСЕ-моделювання ефективно відтворює складну тривимірну картину напруженого стану й може застосовуватися для оцінювання ресурсу турбомашин.

Отримані результати дозволяють не лише оцінити напружено-деформований стан лопатки у часі, але й визначити критичні зони з точки зору накопичення повзучих деформацій та втрати працездатності.

Отримані результати можуть бути використані для: оптимізації геометрії робочих лопаток турбін; підвищення точності оцінювання ресурсу та гарантування безпеки експлуатації елементів турбомашин; розроблення удосконалених методик технічного діагностування; створення прогнозних моделей поведінки матеріалів при довготривалих високотемпературних навантаженнях.

1. *Bråthe, L., Josefson, L.* Estimation of Norton-Bailey parameters from creep rupture data // *Metal Science.* – 1979. – 13, (12). – P. 660–664. <https://doi.org/10.1179/030634579790434312>
2. *May, DL, Gordon, AP, Segletes, DS.* The Application of the Norton-Bailey Law for Creep Prediction Through Power Law Regression // *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 7A: Structures and Dynamics.* San Antonio, Texas, USA. June 3–7, 2013. V07AT26A005. ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2013-96008>
3. *Lemaitre J.* Application of damage concepts to predict creep-fatigue failures // *J. Eng. Mater. Trans. ASME* – 1978. – **101**. – P. 284–292.
4. *Lemaitre J.* How to use damage mechanics // *Nucl. Eng. Des.* – 1984. - **80**. – P. 233–245.
5. *Lemaitre J.* A continuum damage mechanics model for ductile fracture // *J. Eng. Mater. Trans. ASME.* – 1985. – **107**. – P. 83–89.
6. *L. M. Kachanov.* Rupture time under creep conditions // *International journal of fracture.* – 1999. – 97(1). – P. 11–18.
7. *Kachanov M.* Effective elastic properties of cracked solids: critical review of some basic concepts // *Applied Mechanics Review.* – 1992. – 45(8). – P. 304–335. URL <https://doi.org/10.1115/1.3119761>.
8. Dutkiewicz M. [Fracture of structural steel elements: high-temperature creep and hydrogen influence](#); / M. Dutkiewicz, O. Andreikiv, O. Hembara, I. Dolins'ka, O. Chepil. – Elsevier, 2025. – 244 p. DOI <https://doi.org/10.1016/C2024-0-02025-5>
9. Dutkiewicz, M., Hembara, O., Chepil, O., Hrynenko, M., Hembara, T. (2023). A new energy approach to predicting fracture resistance in metals. *Materials*, 16(4) doi:10.3390/ma16041566

10. Viswanathan, R. *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*. – ASM International, 1989. – 440 p. ISBN 978-0-87170-358-3.
11. Jin, C., Hembara, O. V., Hrynenko, M. V. (2021). Computer modeling of the deformation of structural elements under the conditions of creep in the course of hydrogenation of the metal under complex loading. *Materials Science*, 57(3), 397-403. doi:10.1007/s11003-022-00561-6
12. Ivanytskyi, Y., Kharchenko, Y., Hembara, O., Chepil, O., Sapuzhak, Y., Hembara, N. (2019). The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation. Paper presented at the *Procedia Structural Integrity*, 16 126-133. doi:10.1016/j.prostr.2019.07.031
13. Jiang, Q., Hembara, O. V., Chepil, O. Y. (2019). Modeling of the influence of hydrogen on the accumulation of defects in steels under high-temperature creep. *Materials Science*, 55(2), 245-253. doi:10.1007/s11003-019-00296-x
14. Marahleh, G., Kheder, A. R. I., Hamad, H. F. *Creep life prediction of service-exposed turbine blades* // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – 433(1–2). – P. 305–309. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.066>
15. Qin, F., Hembara, O. V., Chepil, O. Y. (2018). Modeling of the influence of hydrogen on the bearing ability of elements of the power-generating equipment under the conditions of temperature creep. *Materials Science*, 53(4), 532-540. doi:10.1007/s11003-018-0106-2
16. Hembara, O. V., Chepil, O. Y., & Hembara, T. V. (2017). Application of the energy approach to the evaluation of the serviceability of the drum of a steam boiler subjected to thermal cycling and hydrogenation. *Materials Science*, 53(1), 102-108. doi:10.1007/s11003-017-0049-z
17. Hembara, O., Chepil, O., Hembara, T., Mochulskyi, V., Sapuzhak, Y. *Influence of temperature and hydrogen on fatigue fracture of 10Kh15N27T3V2MR steel* // *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland)*. – 2020. doi:10.15632/jtam-pl/115214
18. Błachnio, J., Spychała, J., Zasada, D. *Analysis of structural changes in a gas turbine blade as a result of high temperature and stress* // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – 127. – 105554. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105554>
19. Mourad, A.-H. I., Almomani, A., Sheikh, I. A., Elsheikh, A. H. *Failure analysis of gas and wind turbine blades: A review* // *Engineering Failure Analysis*. – 2023. – 146. – 107107. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107107>
20. Rivaz, A., Anijdan, S. M., Moazami-Goudarzi, M., Ghohroudi, A. N., Jafarian, H. R. *Damage causes and failure analysis of a steam turbine blade made of martensitic stainless steel after 72,000 h of working* // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – 131. – 105801. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105801>

BAO Chengao (BAO Chengao) • China University of Geosciences (Wuhan, China);
 • <https://orcid.org/0009-0005-3074-3440>

ГЕМБАРА Тарас Васильович (HEMBARA Taras) • Львівський державний університет безпеки життєдіяльності (Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine);
 • кореспондуючий автор
 • e-mail: taras.gembara@gmail.com
 • <https://orcid.org/0000-0001-7160-9882>

ФІРМАН Володимир Михайлович (FIRMAN Volodymyr)
 • Львівський національний університет імені Івана Франка (Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine);
 • e-mail: vfirman@ukr.net •
<https://orcid.org/0000-0003-0549-8373>