

Г. В. Кречковська^{1, 2} [0000-0001-7392-7753]¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України²Національний університет «Львівська політехніка»**ФРАКТОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ШТОКА РЕГУЛЮВАЛЬНОГО КЛАПАНА ПАРОВОЇ ТУРБІНИ**

Проведено фрактографічний аналіз поверхні руйнування штока регулювального клапана парової турбіни та проаналізовано механізм його руйнування. Досліджено пошкодження в азотованому шарі та основному металі штока. Мікроаналізом виявили вторинні тріщини по всьому периметру штока, що є ознакою слабкої адгезії між основним металом та азотованим шаром, яку зв'язали з внутрішнім окисненням. Класичний боріздовий механізм втомного руйнування зберігався практично на більшій частині зламу штока, що відповідає багатоциклової втоми, і лише на завершальній стадії руйнування візуалізувалися ознаки малоциклової втоми.

Ключові слова: сталь, регулювальний шток парової турбіни, пошкодженість, механізм руйнування.

H. V. Krechkovska**FRACTOGRAPHIC FEATURES OF FRACTURE OF A STEAM TURBINE CONTROL VALVE STEM**

Fractographic analysis of the fracture surface of a steam turbine control valve stem was performed, and its fracture mechanism was examined. Damage inside the nitrided layer and the base metal of a stem was investigated. Microanalysis revealed secondary cracks along the entire perimeter of a stem, a sign of weak adhesion between the base metal and the nitrided layer, and associated with internal oxidation. The classical failure mechanism by fatigue striation formation dominated practically the majority of a stem fracture, which is typical of high-cycle fatigue. Only at the final stage of stem failure were signs of low-cycle fatigue visualized.

Keywords: Steel, steam turbine control rod, damage, failure mechanism.

Постановка проблеми. Надійність і безпечна експлуатація енергетичного обладнання електростанцій значною мірою залежать від роботоздатності елементів парових турбін, які експлуатуються в умовах високих температур, тисків, циклічних навантажень і агресивного середовища. Одним із відповідальних елементів системи регулювання роботи парової турбіни є шток регулювального клапана парової турбіни, від якого залежить стабільність її роботи, ефективність регулювання подачі пари та надійність енергоблоку в цілому. Під час тривалої експлуатації такі штоки зазнають комплексного впливу механічних, термічних та корозійних чинників, що сприяють накопиченню пошкоджень у матеріалі, зародженню та розвитку тріщин, а в окремих випадках спричиняють раптове руйнування. Особливо небезпечними є втомні та корозійно-втомні руйнування, які можуть тривалий час розвиватися без очевидних зовнішніх ознак деградації. Встановлення причин руйнування регулювального штока є важливим завданням технічної діагностики та оцінки залишкового ресурсу енергетичного обладнання. Одним із найінформативніших методів дослідження механізмів руйнування є фрактографічний аналіз поверхонь зламів, який дозволяє визначити характер пошкоджень, локалізувати осередок зародження тріщини, особливості її поширення аж до остаточного руйнування. Аналіз фрактографічних ознак дає можливість встановити домінуючі ознаки деградації матеріалу та встановити причини аварійного руйнування елемента.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тривала експлуатація сталей під впливом температурних, силових та наводнювальних чинників створює передумови для їх деградації, що проявляється зміною мікроструктури, фізико-механічних властивостей та мікромеханізмів руйнування [1–3]. Деградація сталей за дії наводнювальних середовищ залежить від структурно-механічного стану сталей і знижує надійність роботи відповідальних об'єктів енергетики. Крім того, все частіше експлуатаційну деградацію сталей оцінюють з використанням залежностей між механічними і фрактографічними показниками. Розвиток кількісної метало- та фрактографії розширив межі їх застосування для встановлення особливостей впливу різних чинників, зокрема навантажень, температури та корозійно-наводнювальних середовищ [4, 5].

На сьогодні матеріалознавчі методи дослідження широко використовуються для оцінки технічного стану елементів енергетичного устаткування. Основна увага приділяється аналізу мікроструктурних змін та механічних характеристик, оцінюванню корозійно-наводнювальної та термічної стійкості матеріалів. Значний внесок у дослідження механізмів руйнування матеріалів енергетичного обладнання зробили науковці, що займаються вивченням повзучості, втоми, термостійкості та корозійного розтріскування [6–8]. Проте точність подібних прогнозів значною

мірою залежить також від експериментально визначених властивостей матеріалу в конкретний момент його експлуатації в реальних умовах. Попри значний прогрес у дослідженнях, все ще залишається низка не вирішених питань. Зокрема, недостатня надійність прогнозування технічного стану відповідальних елементів зумовлена складністю врахування впливу експлуатаційних факторів на його зміну, відсутністю комплексного підходу, що поєднував би аналіз матеріалознавчих аспектів деградації матеріалів, моделювання напружено-деформованого стану в елементах конструкцій з урахуванням поточного технічного стану деградованих матеріалів, та недостатністю науково-обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення довговічності експлуатованих матеріалів для забезпечення надійності окремих елементів енергетичного обладнання.

Постановка завдань. Метою роботи є дослідження фрактографічних особливостей руйнування штока регулювального клапана парової турбіни для встановлення механізму зародження та розвитку тріщини, визначення характеру руйнування матеріалу й оцінювання впливу експлуатаційних чинників на роботоздатність елемента.

Виклад основного матеріалу. Проаналізовано шток, який зруйнувався у його нижній високотемпературній зоні експлуатації в місці галтельного переходу від конічної частини штока до його головки (рис. 1а). Візуальним аналізом встановлено, що руйнування розпочалося в декількох місцях по периметру штока від пошкоджень у поверхневому азотованому шарі і поширювалося на всю його глибину (до 200 мкм). Поширення руйнування в штоці продовжувало відбуватися незалежними фронтами аж до їх злиття і наступного спонтанного руйнування (рис. 2). На його бічній поверхні в зоні переходу конічної поверхні в циліндричну виявлено сліди контактного зношування (рис. 1б).



Рис. 1. Загальний вигляд поверхні зламу штока регулювального клапана (а) та сліди контактного зношування на бічній його поверхні (б).

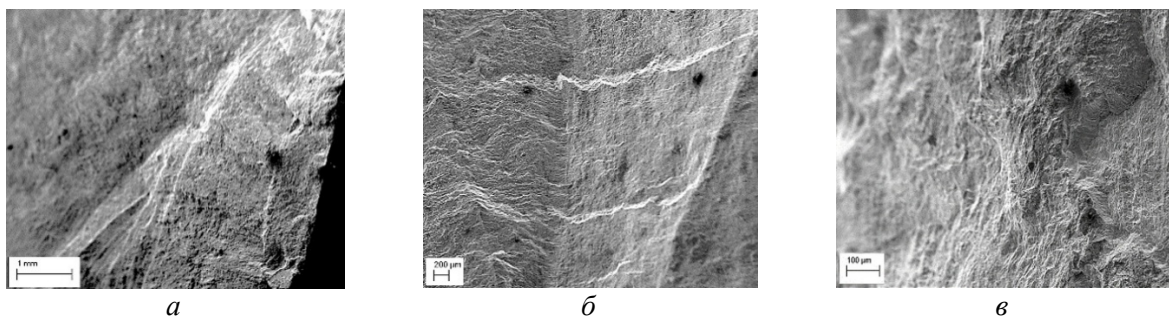


Рис. 2. Макрофрактограми зародження тріщини в декількох місцях по периметру штока.

Мікроаналізом виявили особливості росту тріщин в штоці. Зокрема, практично по всьому його периметру виявили вторинні тріщини, що є ознакою слабкої адгезії між основним металом та азотованим шаром, яку зв'язали з внутрішнім окисненням (рис. 3а). В азотованому шарі руйнування відбувалося внаслідок втомного руйнування перетинок між фрагментами, відокремленими від матриці внутрішнім окисненням з утворенням борізdkового рельєфу, орієнтованого паралельно зовнішній поверхні штока та з вторинним розтріскуванням (рис. 3б).

На переході до основного металу штока спостерігали вторинну тріщину пов'язану з ослабленням когезивного зв'язку між азотованим шаром і матрицею внаслідок внутрішнього окиснення. Загалом на початковому етапі переходу руйнування в основний метал втомні тріщини зароджувалися від затупленої вершини тріщини в азотованому шарі шляхом формування гладкого рельєфу з ледь помітними втомними борізdkами. Зі зростанням довжини тріщини контури борізdk

ставали щораз чіткішими, їх крок більшим, а фестони, поверхню яких покривали борізки, рельєфнішими (рис. 4).

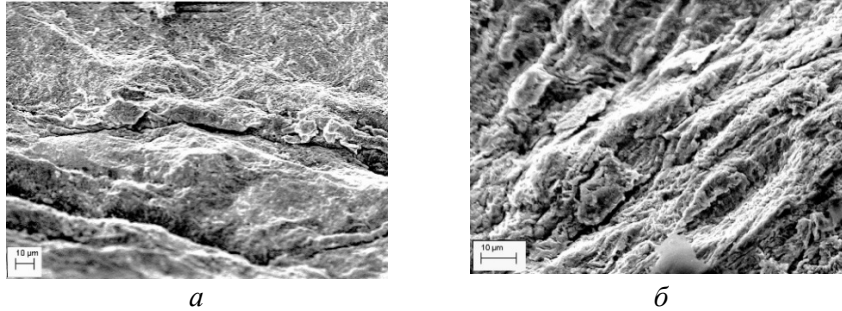


Рис.3. Вторинні тріщини в зоні одного з осередків зародження тріщини (а) та на ділянці азотованого шару (б).

Це ознаки зростання швидкості росту тріщини. Класичний боріздковий механізм втомного руйнування зберігався на більшій частині зламу штока, що зазвичай вважається ознакою багатоциклової втоми (рис. 4в). Чим глибше поширювалося руйнування від бокової поверхні штока, тим більшим ставав крок боріздок, глибшими та чіткішими були вторинні тріщини, які декорували їх, та зростала рельєфність фестонів.

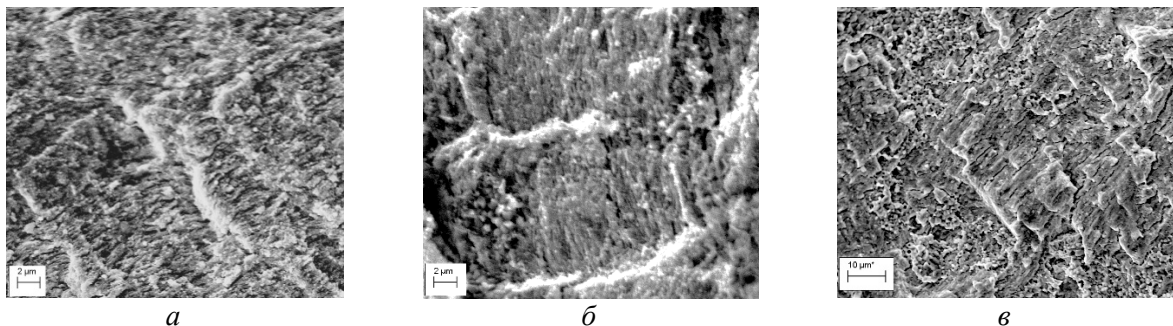


Рис. 4 – Мікрофрактограми, зафіксовані в зонах зародження руйнування в основному металі штока (а, б) та на етапі стабільного його поширення (в).

Разом з тим, по периметру зламу штока були також ділянки, на яких руйнування з азотованого шару поширювалося в основний метал значно пізніше і мало характерні ознаки малоциклової втоми (рис. 5). При цьому на межі азотованого шару та основного металу не спостерігали вторинного розтріскування, а лише затуплення вершини тріщини в азотованому шарі (рис. 5а). Втомне руйнування в основному металі відбувалося зі значними ознаками пластичного деформування, розшарування, формування шевронних візерунків та тракових слідів (рис. 5б, в). Припустили, що передумови для такого руйнування виникли внаслідок заглиблення тріщин в інших місцях по периметру штока внаслідок багатоциклової втоми. А завдяки малоцикловій втомі відбувалося лише вирівнювання фронту руйнування.

Таким чином на основі дослідження мікрофрактографічних особливостей руйнування штока регулювального клапана парової турбіни прийшли до висновку, що воно відбулося внаслідок зародження колових мікротріщин в азотованому шарі через його внутрішнє окиснення та руйнування перетинок між окисненими ділянками завдяки циклічним навантаженням штока, спричинених перепадами тиску пари, турбулентністю потоків та резонансними явищами, коли власна частота коливань штоків співпадає з частотою коливань, спричинених впливом технологічних чинників. Висока концентрація напружень в їх вершинах, низький опір високотемпературному окисненню та руйнуванню матриці (через виділення карбідів хрому і збіднення його вмісту в матриці) сприяли їх проростанню в основу штока за механізмом багатоциклової втоми. Якби наявний у складі сталі ніобій виконав покладену на нього функцію (не допустити зниження вмісту хрому у матриці), то ресурс штока був би значно більшим. Тому в подальшому для недопущення непередбачуваних пошкоджень таких відповідальних конструктивних елементів, як штоки, слід запровадити вхідний контроль структури сталі.

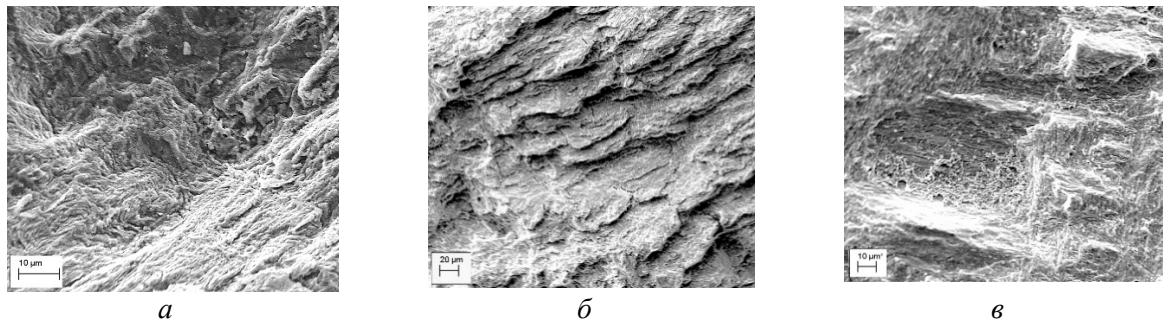


Рис. 5. Мікрофрактограми руйнування штока в зоні росту тріщини за високої асиметрії циклу навантаження (на етапі малоциклової втоми).

Висновки. Макрофрактографічним аналізом виявлено, що шток регулювального клапана парової турбіни зруйнувався внаслідок множинного зародження мікротріщини вздовж його периметру в зоні концентрації напружень на галтельному переході між його конічною частиною і головкою. Зародження тріщин у штоці відбулося за механізмом багато циклової втоми внаслідок низькоамплітудних експлуатаційних навантажень. На етапі зародження тріщини на зламі штоку спостерігали класичні втомні боріздки, які є характерними елементами втомного руйнування. Класичний борізdkовий механізм втомного руйнування зберігався практично на більшій частині зламу штока, що відповідає багатоциклової втоми, і лише на завершальній стадії руйнування проявилися ознаки малоциклової втоми.

Наукові дослідження за Проєктом 2025.02/0031 виконано за рахунок коштів гранту Президента України, наданого Національним фондом досліджень України.

Список використаних джерел:

1. Dlouhý I., Strnadel B., 2008. The effect of crack propagation mechanism on the fractal dimension of fracture surfaces in steels. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, Is. 3–4, pp. 726–738. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.03.038>
2. Hilders O. A., Quintero A., Berrio L., Caballero R., Sáenz L., Peña N., Ramos M., 2000. Effects of aged conditions on the fracture surface fractal dimension and mechanical behavior of an austenitic stainless steel. *Microscopy and Microanalysis*, Vol. 6, Is. S2, pp. 768–769. <https://doi.org/10.1017/S1431927600036333>
3. Nedović S., Alil A., Martinović S., 2025. Novel approach to the surface degradation assessment of 42CrMo4 steel in marine and cavitation erosion environments. *Metals*, Vol. 15 (10), 1154. <https://doi.org/10.3390/met15101154>
4. Wojciech Macek, 2021. Correlation between fractal dimension and areal surface parameters for fracture analysis after bending-torsion fatigue. *Metals*. 11 (11), Number article 1790. <https://doi.org/10.3390/met11111790>
5. Кречковська Г. В., Головчук М. Я., Лісничук А. Є., Студент О. З. 2021, Візуалізація фрактографічних ознак експлуатаційної деградації теплотривкової сталі. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*, №71. 286 – 294.
6. Vorobel R., Student O., Ivasenko I., Maruschak P., Krechkovska H., Zvirko O., Berehulyak O., Mandziy T., Tsybailo I., Solovei P., 2024. Development of a method for computer processing of fractographic images to assess the cohesion of inclusions to the matrix in the weld metal after its operational degradation and hydrogenation. *Materialia*, Number article 102074. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2024.102074>
7. Бреславський Д., Хорошун А., Сенько А., Татарінова О. Аніщенко Г., 2025. Моделювання процесів повзучості та корозійного розтріскування труб. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин, 2, 21–26. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2025.2.336089>
8. Hutsaylyuk V., Student O., Maruschak P., Krechkovska H., Zvirko O., Svirsk L., Tsybailo I., 2023. Analysis of mechanical properties of welded joint metal from tpp steam piping after its operational degradation and hydrogenation. *Materials*, 16, 7520. <https://doi.org/10.3390/ma16247520>
9. Андрейків О. Є., Гембара О. В., 2008, *Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах*, Наукова думка, Київ, Україна, 344 с.

Дата надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення 28.05.2026