

УДК 621.1: 620.193

ВПЛИВ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СТРУКТУРІ СТАЛІ НА ДОЧАСНЕ ПОШКОДЖЕННЯ ДИСКА РОТОРА ПАРОВОЇ ТУРБІНИ

Г. В. КРЕЧКОВСЬКА^{1,2}, П. Р. СОЛОВЕЙ¹, О. З. СТУДЕНТ¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка"

Проаналізовано причини дочасного експлуатаційного пошкодження низки елементів ротора парової турбіни. Встановлено, що навіть після експлуатації механічні характеристики сталей відповідали регламентним вимогам, проте це не запобігло руйнуванню цих елементів. Водночас у структурі сталі 30ХНЗМ1ФА пошкодженого диска ротора виявлено велику кількість корозійно-активних неметалевих включень (КАНВ), які в разі інтенсифікували локальну корозію в їх околі, сприяли формуванню виразок на поверхнях диска та стали осередками зародження корозійно-втомних тріщин. Виконані дослідження вказують на важливість (і для виробників роторів парових турбін, і для експлуатаційників) удосконалення вимог до контролю структури сталі за кількістю дрібних КАНВ та щільністю їх розташування як чинників пришвидшення дочасного (в межах розрахункового ресурсу) корозійно-механічного руйнування дисків роторів.

Ключові слова: *теплотривка сталь, диск ротора парової турбіни, корозійно-активні неметалеві включення, структура, корозійно-втомні тріщини.*

The causes for the premature operational damage of a number of elements of the steam turbine rotor were analyzed. All mechanical characteristics of the steels, even after operation, met regulatory requirements; however, this did not prevent the destruction of the rotor elements. At the same time, a large number of corrosion-active non-metallic inclusions (CANI) were found in the structure of 30KhN3M1FA steel of the damaged rotor disk, which significantly intensified local corrosion in their vicinity, contributed to the formation of pits on all surfaces of the disks, as well as became sites of initiation of corrosion-fatigue cracks. The conducted studies show the importance (both for manufacturers of steam turbine rotors and for operators) of improving the requirements for monitoring the structure of steel in terms of the number of small CANIs and the density of their location as factors accelerating premature (within the design life) corrosion-mechanical fracture of rotor disks.

Keywords: *heat-resistant steel, steam turbine rotor disk, corrosion-active non-metallic inclusions, structure, corrosion fatigue cracks.*

Вступ. Встановити причини дочасного пошкодження відповідальних елементів теплоенергетичного устаткування – важливе завдання, щоб запобігти їх повторному виникненню. Терміни їх безпечної експлуатації регламентують нормативні документи [1, 2]. Елементи роторів на початку експлуатації, як правило, не пошкоджуються, а руйнуються лише через порушення технології виготовлення і монтажу роторів та недотримання регламентних вимог до ключових параметрів експлуатації турбіни. Зокрема, високі згинальні та крутні моменти і наднормова тривалість високорівневих вібрацій сприяють зародженню та швидкому поширенню втомних тріщин від технологічно обумовлених концентраторів напружень [3]. Суттєво на їх роботоздатність впливає також високотемпературне і

Контактна особа: Г. В. КРЕЧКОВСЬКА, e-mail: krechkovskahalyna@gmail.com

корозивно-активне технологічне середовище, яке посилює ерозію, кавітацію та полегшує ріст корозійно-втомних тріщин [4–6]. Пошкодження, спричинені цими чинниками, сприяють виведенню з ладу або окремих елементів, або і всієї турбіни, якщо її вчасно не зупинити. Проте структурні аспекти, пов'язані із присутністю в конструкційних сталях неметалевих включень (як концентраторів напружень) та їх розподілом, останнім часом все частіше привертають увагу дослідників. Вони негативно впливають на механічні властивості сталей, призводять до виникнення мікро- та макротріщин та зумовлюють їх втомне руйнування [7–9]. Існують обмеження щодо їх кількості, форми та розмірів. Сучасними технологіями розкислення сталей можна суттєво зменшити розміри неметалевих включень. Тому виявлення і аналіз їх кількості з допомогою оптичної мікроскопії стає неефективним, а подекуди – і неможливим. Це перешкоджає дотриманню вимог про щільність їх розташування. Оскільки під час виготовлення дисків застосовують великогабаритні сталеві виливки, то хімічні та фізичні процеси, що супроводжують їх кристалізацію, визначають і розміри, і розподіл неметалевих включень у структурі сталі [10]. Зокрема, за розкислення алюмінієм під час кристалізації в сталі формуються включення Al_2O_3 [11] та такі, що містять кальцій у вигляді оксидного або сульфідного складників. Їх поділяють на два типи: оксидні на основі алюмінатів кальцію ($mCaO \cdot nAl_2O_3$) та з оксидним ядром на основі алюмінату кальцію та оболонкою зі сульфиду кальцію, інколи – разом зі сульфідом марганцю. У сталях вони спричиняють аномально високі швидкості локальної корозії, оскільки термодинамічно не стійкі (особливо сульфідні) і можуть зумовлювати зародження пітингів на поверхні металу [12]. Неметалеві включення інтенсифікують локальне анодне розчинення матриці навколо них та сприяють акумулюванню водню на міжфазних межах, з чим пов'язують схильність до корозійно-механічного руйнування трубопроводів [13–15], бурових труб [12, 16], стовбів танків [17] та колтюбінгових труб [18].

Нижче проаналізовано механічні властивості та структурний стан металу диска дочасно пошкодженого ротора парової турбіни, щоб встановити найвірогіднішу причину її вимушеного виведення з ладу.

Об'єкт та методи випробувань. Досліджували теплотривку сталь 30XНЗМ1ФА (mass%: 0,3 С, 0,019 Si, 0,32 Mn, 1,67 Cr, 3,42 Ni, 0,0046 S, 0,0005 P, 0,54 Mo, 0,14 V, 0,11 Cu, Fe – решта) диска ротора парової турбіни, дочасно зруйнованого після $1,22 \cdot 10^5$ h експлуатації (робоча температура 400°C і тиск 10 МПа) (рис. 1).

Рис. 1. Загальний вигляд одного з фрагментів пошкодженого диска ротора парової турбіни.

Fig. 1. General view of one of the fragments of the damaged steam turbine rotor disk.



Зразки для випроб на розтяг і удар вирізали з гребеня пошкодженого диска, орієнтуючи їх відносно його осі у радіальному та тангенціальному напрямках. Границі міцності σ_B та пластичності $\sigma_{0,2}$, відносні видовження δ та звуження ψ визначали за розтягу гладких циліндричних зразків діаметром 5 mm на машині УМЕ-10Т за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Для встановлення ударної в'язкості KCV стандартні зразки Шарпі випробовували на маятниковому копрі ІО-5003. Для металографічних досліджень застосували сканівний електронний

мікроскоп Carl Zeiss EVO-40XVP зі системою спектрального мікроаналізу INCA Energy 350.

Результати випробувань. Аналіз механічних властивостей сталі засвідчив, що характеристики міцності, пластичності та ударна в'язкість практично не залежать від орієнтації зразків до осі диска. Це типово для елементів, виготовлених за технологією литва. Зауважили, що попри відповідність механічних властивостей експлуатованої сталі регламентним вимогам (див. таблицю), диск все ж виявився пошкодженим.

**Механічні властивості сталі 30ХНЗМ1ФА диска парової турбіни,
отримані на зразках різної орієнтації**

Орієнтація зразків до осі диска	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCV, J/cm ²
	МПа		%		
Радіальні	773	653	22	71,0	1,64
Тангенціальні	776	655	21	70,5	1,74
ТУ 108.11.918-87	≥ 740	590...710	≥ 15	≥ 40	—

* Усі механічні характеристики отримані усередненням результатів не менше трьох випробувань з відхиленням від середнього значення не більше 3%.

Під час металографічних досліджень діаметральної поверхні диска з боку подачі пари виявили своєрідну текстуру зі односпрямованих стрічок корозійних виразок, орієнтованих до радіального напрямку диска під кутом 35...45° (рис. 2). Важливо, що внаслідок злиття корозійних виразок формувалися рівчаки, які могли б бути зародками корозійно-втомних тріщин. Причому їх орієнтація відповідала би напрямку поширення цих стрічок.

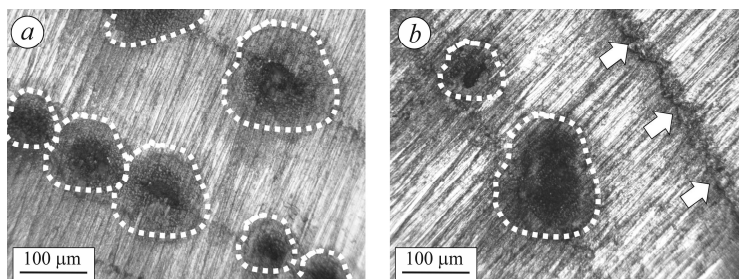


Рис. 2. Сліди локальної корозії (а: штрихові лінії) та тріщина (b: стрілки), виявлені на діаметральній поверхні гребеня диска ротора.

Fig. 2. Traces of localized corrosion (a: dotted lines) and a crack (b: arrows) found on the diametrical surface of the rotor disk ridge.

У структурі сталі диска розподіл пакетів високовідпущеного мартенситу (орієнтація яких змінювалась від зерна до зерна) та дрібних карбідів внаслідок високого відпуску сталі практично рівномірний (рис. 3а). Замість неметалевих включень на шліфі після багаторазового переполірування з подальшим травленням зафіксували значну кількість пор, які відрізнялися і за формою, і за щільністю розташування (рис. 3а, b). В основному неметалеві включення були дрібними (до 5 μm), але серед них траплялися і значно більші (до 15 μm). Причому їх було забагато для такого відповідального елемента ротора, як диск турбіни. Ці включення виявили також на зламі зразка, випробуваного на ударну в'язкість – як одного із надійних способів ідентифікувати дрібні корозійно-активні неметалеві включення (КАНВ) [19]. Адже відомо, що матеріали завжди руйнуються

шляхом мінімального опору, який залежить від сприятливого розподілу включень у робочому перерізі зразка. Їх кількість у випадково обраному перерізі шліфа може бути суттєво менша, ніж на зламі [20]. Адже від їх розподілу на зламі залежить найсприятливіший шлях росту тріщини, який відповідає критично низьким енерговитратам на руйнування зразка чи деталі.

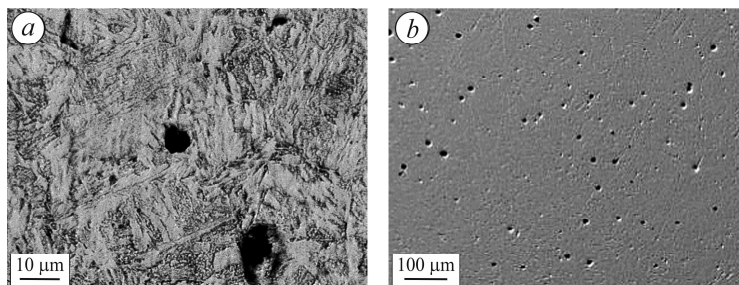
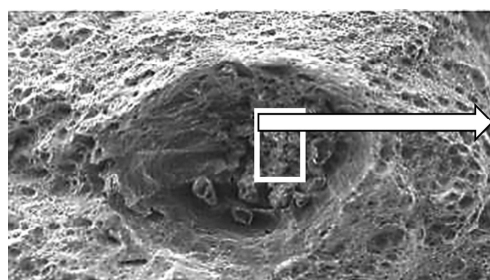


Рис. 3. Типова структура (а) та пори на місцях КАНВ (b) у сталі 30ХНЗМ1ФА диска ротора парової турбіни після $1,22 \cdot 10^5$ h експлуатації.

Fig. 3. Typical structure (a) and pores in the places of corrosion-active non-metallic inclusions (CANIs) (b) in 30KhN3M1FA steel of a steam turbine rotor disk after $1.22 \cdot 10^5$ h of operation.

Результати мікрорентгенівського спектрального аналізу підтвердили, що за вмістом елементів неметалеві включення на зламі ударного зразка слід трактувати як корозійно-активні (рис. 4). Оскільки під час експлуатації диск контактує з технологічним середовищем, то їх вважали небезпечними чинниками, що впливають на інтенсивність виникнення корозійних уражень. Допустима кількість неметалевих включень не повинна перевищувати двох–трьох на 1 mm^2 площі шліфа.



Element	wt%	at. %
O	37,60	55,40
Al	39,30	34,34
S	0,65	0,48
Ca	1,73	1,02
Mn	2,47	1,06
Fe	18,26	7,71
Total	100	

Рис. 4. Типове КАНВ, виявлене на зламі зразка зі сталі 30ХНЗМ1ФА, та його склад за результатами мікрорентгенівського спектрального аналізу.

Fig. 4. Typical CANI detected on a fracture of a 30KhN3M1FA steel specimen and its composition based on the results of micro-X-ray spectral analysis.

Проте за нашими підрахунками їх кількість в аналізованій сталі диска зросла у 20 разів, через що суттєво збільшилась кількість осередків інтенсивної локальної корозії. Зрозуміло, що це не відповідає вимогам до якості сталі таких відповідальних елементів турбіни, оскільки КАНВ – це готові структурні дефекти. Когезія будь-яких включень з матрицею найчастіше ослаблена, через що додатково посилюється вплив експлуатаційних чинників.

На фрактограмі експлуатаційного зламу гребеня диска, що відповідає етапу зародження руйнування від отвору для заклепки, яка з'єднувала гребінь з хвостовиком лопатки, виявили чимало слідів від неметалевих включень з ознаками корозійного впливу технологічного середовища. Зафіксували також вторинне розтріскування, декороване їх рядами (стрілки на рис. 5). Ці вторинні тріщини вважали слідами перетину тріщин контактної втоми, які найчастіше нахилені під

кутами 30...40° до тангенціально орієнтованої поверхні зламу між сусідніми отворами для заклепок в гребені диска. Таке розтріскування у вигляді тріщин, паралельних до поверхні отвору в гребені диска, зумовлене високими питомими навантаженнями, прикладеними до цієї поверхні. Адже під час експлуатації ротора високі навантаження передаються від хвостовиків лопаток до гребенів диска через заклепку, що з'єднує їх. Скупчення КАНВ у структурі сталі сприяють і контактній втомі (усі вторинні тріщини на експлуатаційному зламі декоровані ними), і подальшому поширенню руйнування за корозійно-втомним механізмом. При цьому дрібні виразки на місці неметалевих включень, розпорошені практично по всій поверхні зламу, є структурними концентраторами напружень, які полегшують ріст втомної тріщини.

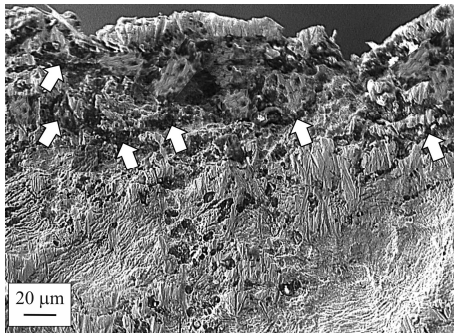


Рис. 5. Зона зародження руйнування у гребені диска ротора від отвору під заклепку, що з'єднувала його з хвостовиком робочої лопатки. Профіль поверхні отвору розташований у верхній частині фрактограми.

Fig. 5. The fracture initiation zone in the rotor disk ridge from the hole for the rivet in its ridge connecting it to the working blade root. The hole surface profile is located in the upper part of the fractogram.

Отже, попри однорідну структуру високовідпущеного мартенситу в сталі з дрібними карбідами вздовж меж пакетів, через значну кількість однонаправлених стрічок з КАНВ саме їх можна вважати відповідальними за її низьку якість. Виявлена орієнтованість стрічок із включень негативно вплинула на опір і зародженню (за механізмом контактної втоми), і поширенню (за механізмом корозійної втоми) руйнування в диску (особливо за їх сприятливої орієнтації до прикладених напружень). Саме це і призвело до його дочасного пошкодження.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано структуру теплотривкої сталі 30ХНЗМ1ФА диска ротора парової турбіни після $1,22 \cdot 10^5$ h експлуатації та її механічні властивості за випробувань на розтяг і удар. Виявлено, що за характеристиками міцності, пластичності та ударною в'язкістю сталь з гребеня пошкодженого диска відповідала вимогам галузевого документа. Її структура мала типові ознаки високовідпущеного мартенситу зі зміною орієнтації пакетів мартенситу від зерна до зерна. Негативною структурною ознакою була велика кількість неметалевих включень, які трактували як корозійно-активні. Їх скупчення у вигляді односпрямованих стрічок сприяли інтенсивній локальній корозії з утворенням мережі корозійних виразок. За дії високих контактних навантажень вони полегшували зародження (внаслідок контактної втоми) та поширення корозійно-втомних тріщин у перетинках між отворами у гребені диска ротора з подальшим відокремленням його фрагментів.

1. *НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004.* – К.: ГРІФРЕ, 2005. – 76 с.
2. *СОУ-Н МПЕ 40.1-21677681-52:2011. Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбіни: методичні вказівки / М. Г. Шульженко.* – К., 2011. – 24 с.
3. *Peculiarities of fatigue fracture of high-alloyed heat-resistant steel after its operation in steam turbine rotor blades / H. Krechkovska, M. Hredil, O. Student, L. Svirsk, S. Krechkovska, I. Tsybailo, and P. Solovey // Int. J. of Fatigue.* – 2023. – **167**, Part B. – Article number 107341. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107341>

4. *High temperature initiation and propagation of cracks in 12% Cr-steel turbine disks* / S. Foletti, A. Lo Conte, S. Salgarollo, and F. Bassi // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2013. – **26**. – P. 123–131. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.26.12>
5. *Failure analysis of a steam turbine rotor* / S. Barella, M. Bellogini, M. Boniardi, and S. Cincera // *Eng. Failure Analysis*. – 2011. – **18**. – P. 1511–1519. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.05.006>
6. *Ke-Shen Cheong and Annette D. Karstensen*. Integrity assessment of an embrittled steam turbine casing // *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*. – 2009. – **86**. – P. 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.11.025>
7. Губенко С. І. Вплив боридних включень на структуру та властивості сталі 04X14ТЗР1Ф для чохлів відпрацьованих паливних касет атомних електростанцій // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2024. – **60**, № 4 – P. 68–75.
8. *Effects of inclusion size and location on veryhigh-cycle fatigue behavior for high strength steels* / Z. Lei, Y. Hong, J. Xie, C. Sun, and A. Zhao // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2012. – **558**, № 15. – P. 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.118>
9. *Murakami Y. and Endo M.* Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength // *Int. J. of Fatigue*. – 1994. – **16**, № 3. – P. 163–182. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0142-1123(94)90001-9)
10. *Неметалеві включення у великому ковальському злитку зі сталі 25ХНЗМФА* / А. В. Нарівський, О. М. Смірнов, М. І. Тарасевич, С. Є. Кондратюк, В. В. Перехода // *Метал та лиття України*. – 2020. – **28**, № 4. – С. 14–18. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>
11. *Вплив технологічних чинників на утворення неметалевих включень вуглецевої сталі та технологічні рекомендації по зниженню їх кількості* / Л. В. Камкіна, О. Г. Безшкуренко, Ю. І. Сокур, А. А. Надточий, В. С. Манідін // *Сучасні проблеми металургії*. – 2014. – **17**. – С. 106–115.
12. *New type of corrosion-active nonmetallic inclusions and their influence on the corrosion of 38KHN3MFA steel* / M. S. Khoma, V. A. Vinar, O. V. Chornyi, Yu. Ya. Maksishko, V. R. Ivashkiv, and N. B. Rats'ka // *Materials Science*. – 2020. – **55**, № 5. – P. 617–624. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00351-y>
13. *Jin T. Y., Liu Z. Y., and Cheng Y. F.* Effect of non-metallic inclusions on hydrogen-induced cracking of API5L X100 steel // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 2010. – **35**, № 15. – P. 8014–8021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.05.089>
14. *Фрактографічне діагностування корозійних пошкоджень трубної сталі з корозійно-активними неметалевими включеннями* / В. Винар, М. Чучман, В. Івашків, Х. Василів // *Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. “Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій”*, 10–11 листопада 2022 р. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 210–212.
15. *On the causes of corrosion fracture of industrial pipelines* / V. Yu. Chernov, V. D. Makarenko, E. I. Kryzhanivskyi, and L. S. Shlapak // *Materials Science*. – 2002. – **38**, № 6. – P. 880–883. <https://doi.org/10.1023/A:1024224204487>
16. *Role of nonmetallic inclusions in premature stress-corrosion fractures of drill pipes* / E. I. Kryzhanivskyi, H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, H. V. Krechkovska, and I. I. Chudyk // *Materials Science*. – 2020. – **55**, № 6. – P. 822–830. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00375-4>
17. *Вплив корозійно-активних неметалевих включень на пришвидшене руйнування внутрішньої поверхні ствола танка Оплот-М* / М. С. Хома, В. А. Винар, Р. М. Юркевич, М. О. Платонов, П. А. Болкот, Н. Б. Рацька, Т. О. Гураль, Б. М. Дацько, В. Р. Івашків // *Військ.-техн. зб.* – 2023. – **29**. – С. 82–90. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023>
18. *Influence of corrosion-active nonmetallic inclusions on the corrosion resistance of steel coiled tubing pipes* / N. Ben, T. O. Gural, O. M. Vasylyv, O. Yu. Vytyaz, Yu. M. Nespliak, and S. I. Kravchuk // *Materials Science*. – 2024. – **60**, № 1. – P. 67–71. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00853-z>
19. *Патент 135837, Україна. Спосіб фрактографічного діагностування забруднення сталей сучасного металопрокату корозійно-активними неметалевими включеннями* / Г. В. Кречковська, В. А. Винар, О. З. Студент, М. С. Хома, Г. М. Никифорчин. – Опубл. 25.07.2019; Бюл. № 14.
20. *Krechkovska H. V.* Structural-fractographic features of structural steels after long-term operation // *Materials Science*. – 2021. – **57**, № 2. – P. 228–233. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00536-z>

Одержано 26.11.2024