

УДК 669.539.43

Галина Кречковська д.т.н., с.досл.; Петро Соловей; Леся Свірська, к.т.н.; Іван Курнат, Олександра Студент, д.т.н., проф.

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОШКОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОТОРІВ ПАРОВИХ ТУРБІН ВНАСЛІДОК КОНТАКТНОЇ ВТОМИ

Анотація. Проаналізовано причини експлуатаційних пошкоджень в дисках роторів парової турбіни на двох об'єктах енергетики. Показано, що сумісний вплив концентраторів напружень та технологічного середовища сприяли зародженню в них тріщин контактної втоми та їх поширенню внаслідок корозійної втоми.

Ключові слова: диск ротора турбіни, експлуатаційне руйнування, контактна втома, корозійна втома, механізм руйнування.

Halyna Krechkovska, Ph.D.; Petro Solovei; Lesya Svirska, Ph.D.; Ivan Kurnat, Oleksandra Student, Ph.D., Prof.

OPERATIONAL DAMAGE TO STEAM TURBINE ROTOR ELEMENTS AS A RESULT OF CONTACT FATIGUE

Abstract. The causes of operational damage in steam turbine rotor disks at two energy facilities are analyzed. It was shown that the combined influence of stress concentrators and the technological environment contributed to the initiation of contact fatigue cracks in them and their propagation due to corrosion fatigue.

Key words: turbine rotor disk, operational failure, contact fatigue, corrosion fatigue, failure mechanism.

Вступ. Теплова енергетика України в умовах сьогодення перебуває у складних обставинах, спричинених значною зношеністю устаткування та руйнівними ударами сусідньої держави-терориста. Адже близько 90% потужностей ТЕС досягли межі вичерпування планового ресурсу (10^5 год), а 51% з них – фізичного зносу за паркового ресурсу понад $2 \cdot 10^5$ год. Елементи роторів парових турбін відносять до критично важливих, тому необхідно забезпечити їх безперебійну роботу. Адже сумісний вплив високих експлуатаційних напружень та корозійно-наводнювального технологічного середовища, підсилений втратою початкових властивостей теплозв'язаних сталей внаслідок їх деградації під час тривалої експлуатації [1], робить їх найбільш уразливими елементами енергогенеруючого устаткування. Руйнування дисків роторів парових турбін супроводжується масштабними пошкодженнями із реальною загрозою життю персоналу та довкіллю. Тому оцінювання поточного стану тривало експлуатованих сталей дисків та аналіз причин, які спричинили їх пошкодження, є важливими для упередження таких ексцесів у майбутньому. Нижче з'ясовано причини руйнування двох дисків роторів парових турбін після різної тривалості експлуатації на різних об'єктах та оцінено технічний стан теплозв'язаних сталей за їх властивостями.

Матеріали та методики дослідження. Причини пошкодження аналізували на вирізках з пошкоджених дисків роторів високого тиску парових турбін після їх експлуатації близько 14 та 35 років. Аналізовані елементи були виготовлені зі сталей 30ХНЗМ1ФА (мас. %: 0,3 С; 1,67 Cr; 0,54 Мо; 3,42 Ni; 0,14 V; 0,11 Cu; 0,19 Si; 0,32 Mn; 0,005 S; 0,0005 P) та 34ХНЗМ (мас. %: 0,32 С; 0,91 Cr; 0,29 Мо; 2,8 Ni; 0,41 Si; 0,59 Mn; 0,053 S; 0,039 P), відповідно. В обох турбінах був використаний різний принцип кріплення лопаток з диском ротора. В першому з них, вилкоподібні хвостовики лопаток

з'єднувалися з гребенями диску заклепками, які проходили через наскрізні отвори в обох елементах. А в другому – їх з'єднання забезпечувала відповідність профілів Т-подібних хвостовиків лопаток і пазу у диску ротора.

Для аналізу стану експлуатованих сталей використали характеристики міцності та пластичності та фрактографічний аналіз експлуатаційних зламів. Механічні властивості дискових сталей визначали на гладких циліндричних зразках діаметром 5 мм. Їх випробовували на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Структурні та фрактографічні особливості аналізованих елементів, зруйнованих під час експлуатації, аналізували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

Експериментальні результати. *Структура експлуатованих сталей.* У структурі сталі 30ХНЗМ1ФА після меншої тривалості експлуатації виявили дрібні карбіди завбільшки до 0,5 мкм, які зберегли зв'язок з феритною матрицею, і лише найкрупніші з них частково відшарувались від неї (рис. 1а). Тоді як в триваліше експлуатованій сталі 34ХНЗМ ознаки втрати зв'язку карбідів з феритною матрицею у вигляді дрібних ямок на місці карбідів виявились істотніше, що свідчило про її інтенсивнішу деградацію на мікроструктурному рівні (рис. 1б). Попри те, що триваліше експлуатована сталь зберегла цілісність на макрорівні, вона практично втратила її на мікрорівні і перетворилася у матрицю з великою кількістю мікропорожнин (структура типу пемзи). Така тенденція накопичення пошкоджень, внаслідок втрати когезії між включеннями і матрицею, узгоджується з особливостями пошкоджень у металі шва теплотривкої сталі 15Х1М1Ф після тривалої експлуатації на парогоні ТЕС [2].

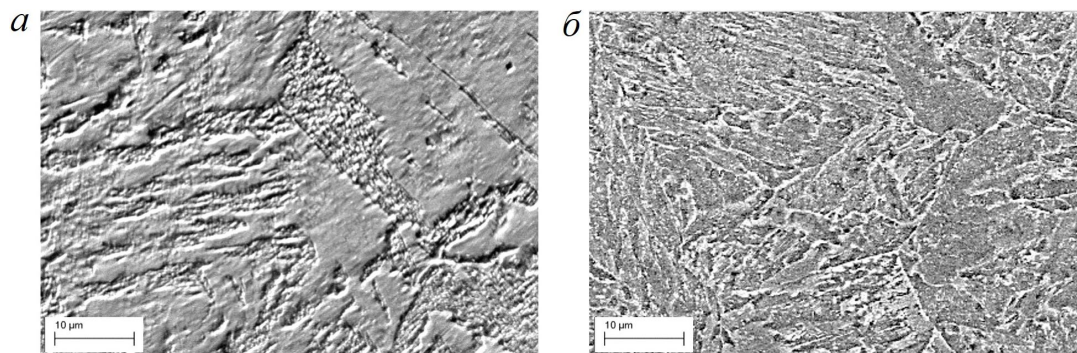


Рис. 1. Мікроструктура сталей 30ХНЗМ1ФА (а) та 34ХНЗМ (б) дисків роторів парових турбін після 14 та 35 років експлуатації, відповідно.

Механічні властивості дискових сталей. Через концентратори напружень в гребенях і ободах дисків, яких неможливо уникнути під час їх виготовлення, вони найвразливіші до пошкоджень. Під впливом відцентрових сил, що діють на лопатки, рівень напружень в найслабших перерізах дисків може короткочасно досягати навіть границі плинності металу. Тому контроль технічного стану металу на відповідність регламентованим рівням міцності і пластичності є важливим для прогнозування роботоздатності непошкоджених дисків, експлуатованих за подібних умов. У таблиці наведені результати атестації обох сталей дисків за випроб на розтяг.

Таблиця. Механічні властивості сталей гребенів дисків роторів турбін

Сталь	Орієнтація зразка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
30ХНЗМ1ФА	Радіальна	773	653	22	71,0
	Тангенціальна	776	655	21	70,5
ТУ 108.11.918-87		≥ 740	590 – 710	≥ 15	≥ 40
34ХНЗМ	Тангенціальна	999	935	13	51
ГОСТ 4543-2016		686 – 883	≤ 816	≥ 13	≥ 40

Виявили, що механічні властивості сталі 30ХНЗМ1ФА практично не залежали від орієнтації зразків, що узгоджувалось з технологією виготовлення дисків ротора методом литва (див. таблицю). Адже в литій структурі анізотропія властивостей звикло не проявляється. Основне, що попри 14-річну експлуатацію механічні властивості сталі диску продовжували відповідати регламентним вимогам. Отже, якби не дочасне пошкодження елементів ротора, то і не було б підстав зупиняти турбіну.

Водночас результати випроб на розтяг сталі 34ХНЗМ після експлуатації в диску ротора парової турбіни показали, що її границі міцності σ_B та плинності $\sigma_{0,2}$ досягли 999 та 935 МПа, а відносні видовження і звуження – 13 та 51%, відповідно. Отже, після 35 років експлуатації ця сталь за всіма показниками (окрім ψ) перестали відповідати вимогам регламенту, що вважали ознакою її критичної деградації.

Причини руйнування дисків. Аналіз дефектів на поверхні гребеня диска зі сталі 30ХНЗМ1ФА в околі його зламу виявив велику кількість корозійних уражень (рис. 2а). Їх появу пов'язали з неприпустимо великою кількістю так званих корозійно-активних неметалевих включень у структурі сталі (рис. 2б), що спричинили неприйнятну для таких відповідальних елементів як диски роторів електрохімічну гетерогенність сталі. Мікрорентгенівський спектральний аналіз показав в складі цих включень алюмінати кальцію за різного співвідношення CaO та Al₂O₃ з додатками оксидів магнію і кремнію, оточених оболонкою з кальцій сульфїду, або сульфїду марганцю. Негативний вплив неметалевих включень чітко проявився в околі макротріщини від отвору під заклепку в гребені диска у вигляді густої мережі паралельних мікротріщин, спричинених контактною втомою (рис. 2в). Під діє високих контактних навантажень між поверхнею отворів в гребені диска і заклепками ці тріщини, розташовані на різній віддалі від поверхні отворів, зливалися шляхом руйнування перетинок до найближчих неметалевих включень у структурі сталі за механізмом зсуву. Перетворення однієї із цих тріщин на магістральну сприяло її переорієнтації на нормально орієнтовану стосовно поверхні отвору тріщини та її поширенню вже під дією циклічних навантажень розтягу з формуванням типового рельєфу з паралельних утомних борїздок (рис. 2г).

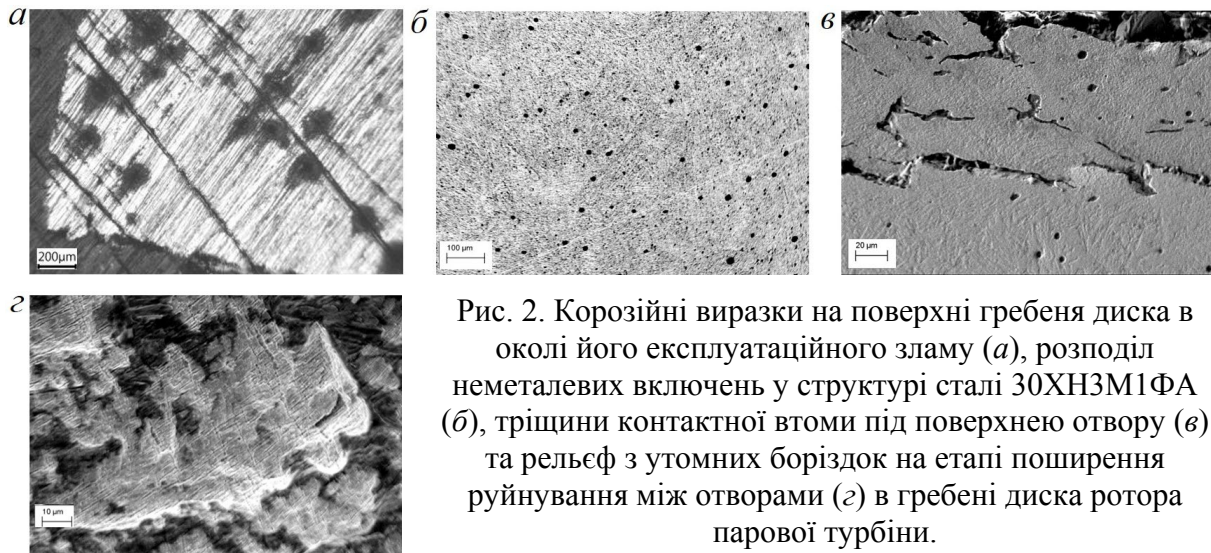


Рис. 2. Корозійні виразки на поверхні гребеня диска в околі його експлуатаційного зламу (а), розподіл неметалевих включень у структурі сталі 30ХНЗМ1ФА (б), тріщини контактної втоми під поверхнею отвору (в) та рельєф з утомних борїздок на етапі поширення руйнування між отворами (г) в гребені диска ротора парової турбіни.

Отже, попри відсутність очевидних структурних ознак деградації сталі 30ХНЗМ1ФА (відшарування карбїдів від матриці) та відповідність її механічних властивостей регламентним вимогам, диск ротора парової турбіни все ж дочасно зруйнувався (всього після 14 років експлуатації), що обумовлено несприятливим поєднанням низки чинників: структурного (неприпустимо висока густина корозійно-

активних неметалевих включень), активного технологічного середовища (взаємодія з яким сприяла формуванню мережі дефектів на включеннях), конструктивно невіддале рішення з'єднання хвостовиків робочих лопаток та диску (сприяло виникненню високих контактних навантажень між ними та зародженню мережі тріщин контактної втоми), та механічного (висока концентрація напружень сприяла утомному росту тріщин в перетинках між отворами для заклепок).

Аналізуючи причини руйнування диску ротора парової турбіни після 35 років експлуатації, в структурі сталі 34ХНЗМ не виявили надмірної кількості неметалевих включень, що убезпечило диск від дочасного формування мережі пошкоджень корозійно-механічного походження. Разом з тим, через порушення зазорів між Т-подібними хвостовиками лопаток та гребенем диску внаслідок тривалої експлуатації ротора, не вдалося уникнути значного наклепу під поверхневих шарів контактуючих елементів. Відповідні сліди пластичного деформування поверхневих шарів гребеня диску виявили в околі зони їх контакту з хвостовиками лопаток (рис. 3а). Це сприяло виникненню тріщин контактної втоми у підповерхневих прошарках гребеня диску (рис. 3б). Особливістю руйнування диску після тривалої експлуатації стало те, що ослаблення когезії карбідів з матрицею, відзначеного під час металографічних досліджень, спричинило, крім того, ослаблення когезії між суміжними зернами. Як наслідок, стало можливим поширення руйнування в диску за корозійно-втомним механізмом (практично шляхом міжзеренного руйнування, рис. 3в).

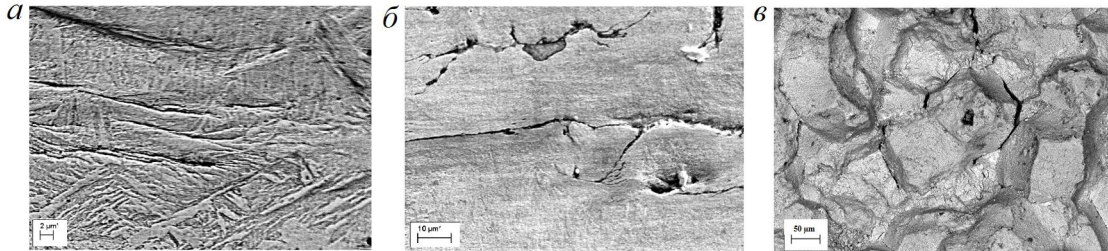


Рис. 3. Сліди пластичної деформації на поверхні гребеня диску зі сталі 34ХНЗМ в околі його експлуатаційного зламу після 35 років експлуатації в роторі парової турбіни (а), тріщини контактної втоми під зоною контакту гребеня диску та полички хвостовика лопатки (б) та корозійно-втомний рельєф експлуатаційного зламу гребеня диску на етапі поширення руйнування (в).

Висновки. Руйнування обох аналізованих дисків розпочиналося з контактної втоми. Проте дочасне руйнування дискової сталі 30ХНЗМ1ФА (всього після 14 років експлуатації в роторі турбіни) відбулося через несприятливу комбінацію структурного, корозійного та механічного чинників, які пришвидшили перехід від контактної втоми до поширення руйнування за класичним для втоми крізьзеренним механізмом з формуванням утомних боріздок. Тоді як в сталі 34ХНЗМ після 35 років експлуатації відбулися структурні зміни, що ослабили межі зерен та створили сприятливі передумови для поширення руйнування диска за міжзеренним механізмом, властивим корозійній утомі.

Перелік посилань

1. Ranking of the mechanical characteristics of steels of steam pipelines of thermal power plants by their sensitivity to in-service degradation / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, L. M. Svirska, B. I. Kindratskyi, V. V. Shyrovkov // Materials Science. – 2021. – 57, 3. – P. 404-412. DOI:10.1007/s11003-021-00554-x.

2. 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 / R. Vorobel, O. Student, I. Ivasenko, P. Maruschak, H. Krechkovska, O. Zvirko, O. Berehulyak, T. Mandziy, I. Tsybailo, P. Solovei // Materialia (MTLA). – 2024. – 34. Article number: 102074. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102074.