

УДК 669.539.43

Галина Кречковська, доктор технічних наук, старший дослідник

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

МЕТАЛОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАКЛЕПКОВИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ

Анотація. Проаналізовано механічні властивості (ударну в'язкість, характеристики міцності та пластичності) заклепкових з'єднань парової турбіни ТЕС. Показано, що сумісний вплив напружень та технологічного середовища сприяв зародженню та поширенню в них втомних тріщин. Встановлено, що механічні характеристики сталей заклепкових з'єднань відповідали вимогам регламентованих документів, але все ж таки вони зруйнувалися. Причиною руйнування, ймовірно, була значна кількість неметалевих включень, які, як концентратори напружень, могли стати причиною руйнування заклепкових з'єднань.

Ключові слова: заклепкові з'єднання, механічні властивості, структура.

Halyna Krechkovska

METALLOGRAPHIC FEATURES OF RIVET JOINTS OF STEAM TURBINES

Abstract. The mechanical properties (impact toughness, strength, and ductility) of riveted joints in a TPP steam turbine were analyzed. It was shown that the combined effect of stresses and the technological environment contributed to the initiation and propagation of fatigue cracks. It was established that the mechanical characteristics of the steel used in the riveted joints met the requirements of the regulatory documents, yet they nevertheless collapsed. The cause of the collapse was probably a significant number of non-metallic inclusions, which, as stress concentrators, could cause the collapse of the riveted joints.

Keywords: rivet joints, mechanical properties, structure.

Вступ. Надійність і довговічність елементів парової турбіни є ключовими для безпечної експлуатації енергетичного обладнання. Аналіз випадків їх руйнування свідчить, що основними причинами відмов є дефекти матеріалу, недостатня втомна міцність і концентрація напружень. Водночас підвищені температури експлуатації та розвиток повзучості матеріалу суттєво впливають на зародження і поширення тріщин в елементах [1, 2]. Чинником деградації є корозійно-ерозійні процеси в агресивному паровому середовищі, які спричиняють формування дефектів та прискорюють розвиток тріщин при циклічному навантаженні. Синергічна дія цих чинників призводить до суттєвого зниження довговічності та експлуатаційної надійності елементів парових турбін.

Одними із елементів парової турбіни є заклепкові з'єднання, якими кріпляться робочі лопатки до диска турбіни. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні міцності та надійності роторної системи, і руйнування заклепок чи послаблення з'єднання спричинятиме зміну напружено-деформованого стану лопаток, підвищення динамічних навантажень, що призведе до аварійного відриву лопаток і пошкодження турбіни. Встановлення особливостей руйнування заклепкових з'єднань парової турбіни є актуальним дослідженням, оскільки аналіз механічних властивостей та мікроструктурних змін дозволяє обґрунтувати причини їх відмови та надати рекомендації щодо їх експлуатації.

Матеріали та методики дослідження. Причини пошкодження елементів парових турбін аналізували на заклепкових з'єднаннях, які експлуатувалися 129 978 год. Вони виготовлені зі сталей 25X1МФ (мас. %: 0.26 C, 0.22 Si, 0.54 Mn, 1.85 Cr, 0.002 S,

$\leq 0,0005$ P, 0.14 Ni, 0.19 V, 0.29 Mo, 0.12Cu) та 18X11МНФБ (мас. %: 0.21 C, 0.57 Si, 0.62 Mn, 10.95 Cr, $\leq 0,0005$ S, $\leq 0,0005$ P, 0.59 Ni, 0.27 V, 0.89 Mo, 0.24 Nb).

Для аналізу стану експлуатованих сталей використали характеристики міцності та пластичності, а також ударну в'язкість. Механічні властивості сталей визначали на гладких циліндричних зразках діаметром 5 мм і їх випробовували на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Ударну в'язкість визначали на маятниковому копрі на зразках Менаже. Металографічні особливості елементів аналізували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

Результати досліджень і їх аналіз. Ударна в'язкість та механічні властивості міцності та пластичності сталей 18X11МНФБ та 25X1МФ заклепкових з'єднань відповідали вимогам регламентованих документів ГОСТ 5949-75 та ГОСТ 20072-74 (див. таблицю). Слід відзначити, що звикло значення KCU приблизно на 25 % вище за KCV (оскільки відбиває енергозатрати в основному на поширення руйнування), і тому вимоги регламенту не порушилися [3].

Таблиця – Механічні властивості сталей заклепкових з'єднань

Сталь	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV, МДж/м ²
Сталь 18X11МНФБ	898	749	17	74,0	0,96
ГОСТ 5949-75, прутки, гартування 1080 – 1130°C у повітрі, відпуск 660 – 770°C у повітрі	Понад 740	590-735	Понад 15	Понад 50	KCU $\geq 0,59$
Сталь 25X1МФ	825	763	17	63,0	1,82
ГОСТ 20072-74, прутки, полоси, товщина до 25мм, гартування 880 – 900°C в оливі, відпуск 640 – 660°C у повітрі	Понад 880	Понад 735	Понад 14	Понад 50	KCU $\geq 0,59$

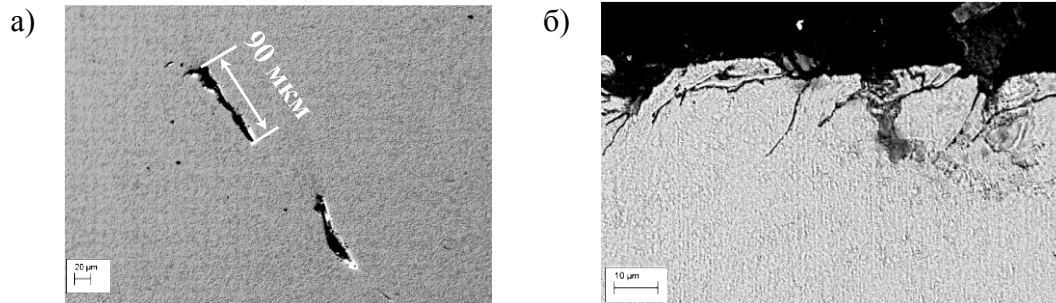


Рисунок 1. Мікроструктура сталі 25X1МФ заклепок (а) та морфологія розтріскування поверхневих шарів (б)

Металографічним аналізом виявлено, що структура сталі 25X1МФ заклепки є однорідною механічною сумішшю дрібнодисперсних (до 0,5 мкм) карбідів у фериті (структура типу троститу). Це типова структура сталі після термічної обробки шляхом гартування і високого відпуску. В структурі виявлено пошкодження досить великих розмірів від 65 до 90 мкм, причиною яких є корозійно-активні неметалеві включення (рис.1а). Вони інтенсифікують локальне анодне розчинення матриці навколо них та сприяють акумулюванню водню на міжфазних межах, з чим пов'язують схильність до корозійно-механічного руйнування. Ці включення є концентраторами напружень, і їх вміст у сталі заклепки є небезпечним, особливо біля поверхні, через потрапляння вологи в зону контакту заклепки з диском. Підповерхневі пошкодження у вигляді відшарувань, корозійні виразки як результат впливу робочого технологічного середовища сприятимуть зародженню і поширенню тріщин (рис.1б).

У мікроструктурі сталі 18X11МНФБ заклепок виявили також включення і мікрорентгенівським спектральним аналізом встановили, що це бориди ніобію (мас. %: 15.98 В, 1.71 Cr, 82.31 Nb). Зафіксовано значну кількість пошкоджень у вигляді пор, що є недопустимо для елементів, що працюють при високій температурі (рис. 2а). Також виявлено скупчення фаз на основі ніобію (рис.2б). Великі розміри цих виділень (довжина до 10 мкм) та специфічна форма (витягнені пластинки або навіть огранені геометричні фігури) створювали додаткову концентрацію напружень на мікрорівні, але, найголовніше, не виконували звичку покладену за легування ванадієм і ніобієм роль зв'язати вуглець в стійкі карбіди і запобігти збідненню твердого розчину на вміст у ньому хрому. Це могло сприяти виділенню карбідів, багатих на вміст у них хрому, вздовж меж зерен і кристалів мартенситу та погіршити їх роботоздатність за високої температури через послаблення меж зерен та міжфазних меж у матриці.

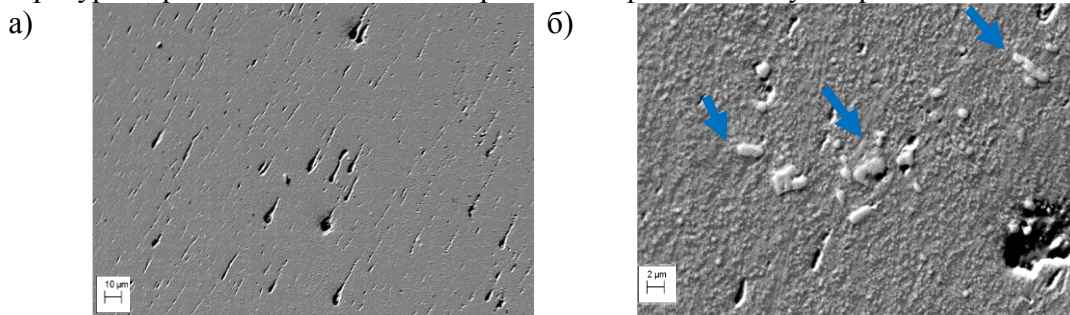


Рисунок 2. Включення боридів ніобію (а) і пошкодження від них (б) в сталі 18X11МНФБ.

Отже, негативним чинником впливу на роботоздатність заклепкових з'єднань є достатньо висока густина неметалевих включень в їх структурі. Підвищена корозійна активність за контакту з технологічним середовищем сприяла розчиненню матриці навколо них з формуванням розвиненої мережі структурних дефектів, які полегшували зародження та поширення тріщин. Враховуючи значну кількість включень у сталях, рекомендовано забезпечити вхідний металографічний контроль на наявність неметалевих включень у структурі, а також їх кількість та розміри.

Висновки. В сталі заклепкових з'єднань ударна в'язкість та механічні властивості міцності та пластичності відповідали вимогам регламентованих документів. В структурі сталі виявлено значну кількість неметалевих включень, як корозивно-активних, так і боридів ніобію, які були ініціаторами зародження пошкоджень, що знижували здатність сталі чинити опір високотемпературному руйнуванню, особливо за їх розташуванням в зоні контакту ребер диска з вилкоподібними елементами хвостовика лопатки.

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

1. Stress-corrosion crack propagation in nuclear steam turbine rotor steels: effects of microstructure in a simulated environment. S. Weng, Y. Huang, S. Lin, F.-Z. Xuan, Journal of Materials Research and Technology. 17 (2022) 725–742. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.020>
2. Solovey P., Krechkovska H., Student O. Structural-fractographic indicators of operational damage in steam turbine rotor disc steel. Scientific Journal of TNTU (Tern.), 2025, vol. 120, no. 4, pp. 90–98. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2025.04.090
3. H.V. Krechkov's'ka, O.Z. Student, Determination of the Degree of Degradation of Steels of Steam Pipelines According to Their Impact Toughness on Specimens with Different Geometries of Notches, Materials Science. 52, Is.4 (2017) 566–571). <https://doi.org/10.1007/s11003-017-9991-z>