

УДК 669.295:621.793:620.178.162.4

Петро Соловей м.н.с., аспірант, Галина Кречковська, д.т.н., старший дослідник, Олександра Студент, проф., д.т.н, Іван Курнат, гол. інж.

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

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 20Х13 ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЛОПАТКАХ РОТОРА ПАРОВОЇ ТУРБІНИ

Анотація. Показано, що навіть після $1,2 \times 10^5$ годин високотемпературної експлуатації сталі 20Х13 в лопатках ротора парової турбіни всі її властивості на поздовжніх зразках відповідали вимогам, а характеристики пластичні поперечних зразків були занижені.

Ключові слова: сталь 20Х13, лопатки ротора парової турбіни, тривала високотемпературна експлуатація, механічні властивості за розтягу і удару.

Petro Solovey, Halyna Krechkovska, Oleksandra Student, Ivan Kurnat

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

MECHANICAL PROPERTIES OF 20X13 STEEL AFTER LONG-TERM HIGH- TEMPERATURE OPERATION IN STEAM TURBINE ROTOR BLADES

Abstract. It was shown that, even after 1.2×10^5 hours of high-temperature operation of 20X13 steel in steam turbine rotor blades, all its tensile properties on longitudinal specimens met regulatory requirements, whereas those of transverse specimens were underestimated.

Keywords: 20X13 steel, steam turbine rotor blades, long-term high-temperature operation, tensile mechanical properties.

Вступ. Незалежно від типу енергогенеруючих установок, такі складні агрегати, як ротори парових турбін (РПТ), значною мірою визначають надійність, економічність, маневреність та безпеку електростанцій. Зокрема, руйнування елементів лопаткового апарату РПТ спричиняє значні економічні збитки і загрожує станційному персоналу та довкіллю. Витрати на виготовлення лопаток (як відповідальних, достатньо дорогих і уразливих елементів РПТ) досягають 17...27 % від загальних витрат на виготовлення ротора. Серед найчастіших причин їх пошкодження називають механічні (високий рівень вібрацій та надмірні відцентрові сили, згинальні та крутні моменти), негативний вплив високотемпературного технологічного середовища з деградацією структури і властивостей металу, що забезпечували їх надійність на початку експлуатації. Це вимагає вироблення чітких критеріїв оцінювання роботоздатності лопаток на будь-якому їх етапі експлуатації. Проте оцінювання поточного технічного стану металу лопаток не є поширеною практикою. Для обґрунтування їх роботоздатності корисними є закономірності зміни структури та механічних властивостей (таких як твердість, міцність та пластичність, ударна в'язкість), встановлені для високохромистих сталей після тривалої експлуатації у РПТ [1, 2]. Разом з тим, це не виключає потреби в атестації експлуатованих сталей на їх відповідність регламентним вимогам після експлуатації. Така інформація важлива для поповнення бази даних про властивості експлуатованих сталей, доповнення і уточнення відомих закономірностей їх зміни внаслідок високотемпературної деградації та для прогнозних оцінок роботоздатності лопаток в конкретних експлуатаційних температурно-силових умовах.

Мета роботи – оцінити відповідність регламентним вимогам механічних властивостей у поздовжньому і поперечному напрямках лопаток РПТ зі сталі 20Х13 після $1,2 \times 10^5$ год експлуатації, щоб запобігти їх пошкодженню в майбутньому.

Матеріали та методики досліджень. Досліджено сталь 20X13 робочих лопаток РПТ після $1,2 \cdot 10^5$ год експлуатації за температури 400°C і тиску технологічного середовища 10 МПа. Для атестації технічного стану сталі використали характеристики міцності (границі міцності σ_B та плинності $\sigma_{0,2}$) та пластичності (відносні видовження δ та звуження ψ), які визначали відповідно до чинних рекомендацій. Гладкі циліндричні зразки діаметром 5 мм з п'ятикратною довжиною робочої частини випробовували на розривній машині УМЕ-10Т за температури 22°C у повітрі за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3}$ с. Випробовували на розтяг зразки поздовжньої і поперечної орієнтацій відносно осі пера лопатки. Хімічний склад сталі визначали на іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5. Для металографічного і фрактографічного аналізу використали сканівний електронний мікроскоп Carl Zeiss EVO-40XVP.

Результати досліджень і їх аналіз. За вмістом елементів сталь робочих лопаток РПТ відповідала хімічному складу сталі 20X13 (мас. %: 0,20 C; 0,27 Si; 0,36 Mn; 0,003 S; 0,001 P; 13,50 Cr; 0,21 Ni; до 0,03 кожного з елементів Mo, V, Co, Nb). Відповідно до технології виготовлення лопатки формувалися високотемпературним куванням в діапазоні $850\text{--}1250^\circ\text{C}$ з наступним гартуванням від температури 1050°C в оливі і високим відпуском при 700°C . Внаслідок цього в структурі сталі формувався дрібнодисперсний сорбіт відпуску, основні ознаки якого збереглися і після експлуатації сталі в лопатках РБТ (рис. 1). Відзначили також наявність в структурі сталі значної кількості великих (до 10 мкм) неметалевих включень, сліди яких чітко виділялись на травлених шліфах у поздовжньому і поперечному перерізах відносно пера лопатки. Температура плавлення включень (сульфіди, оксиди та силікати), як правило, перевищує пікову температуру кування сталі 20X13 (1250°C), і тому вони залишаються у твердому розчині аустеніту, дещо витягнутими у напрямі деформування (рис. 1а). Після експлуатації сталі зберіглося характерне орієнтування пакетів мартенситу у трьох напрямках, властиве структурі гартованих сталей мартенситного класу. Чіткіше це проявилися у великих первинних зернах аустеніту на поперечному шліфі (рис. 1б).

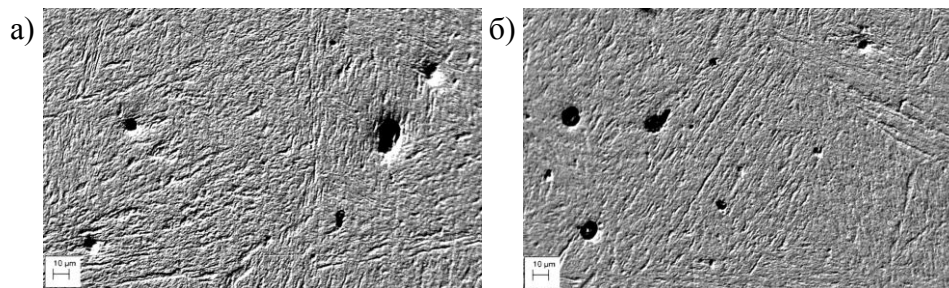


Рисунок 1 – Мікроструктура сталі 20X13 після $1,2 \cdot 10^5$ год експлуатації в робочій лопатці РПТ, виявлена у поздовжньому (а) і в поперечному (б) перерізах її пера.

Макроаналіз реального зламу експлуатованої в РПТ лопатки показав домінування грубого каменеподібного зламу в усьому її перерізі (рис. 2а). За вищої роздільної здатності є очевидним поєднання на зламі фасеток міжзеренного руйнування з значним вторинним розтріскуванням вздовж меж великих за розмірами зерен із слідами в'язкого витягування на переходах між несприятливо розташованими зернами, які суттєво відхиляють напрямок поширення руйнування від нормальної орієнтації стосовно прикладених до лопатки відцентрових сил (рис. 2б). Ямкоподібний рельєф цих ділянок свідчив про збереження експлуатованою сталлю все ще значного запасу пластичності.

За результатами випробувань на розтяг отримали діаграми навантаження поздовжніх і поперечних (стосовно пера лопатки) зразків (рис. 3), з яких визначили механічні властивості сталі в двох ключових для забезпечення роботоздатності лопаток напрямках (таблиця).

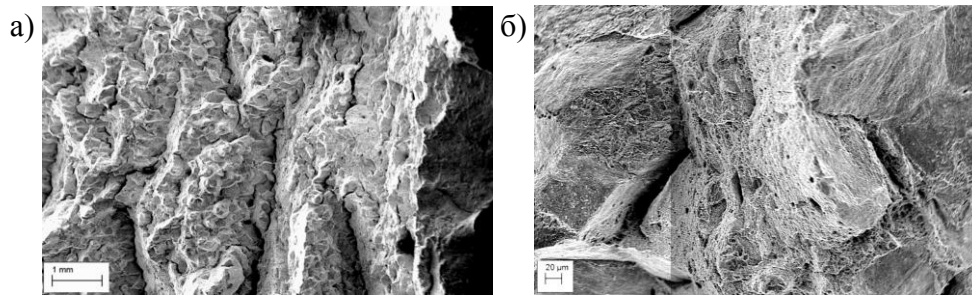


Рисунок 2 – Фрактограми реального експлуатаційного зламу хвостовикової частини робочої лопатки РПТ зі сталі 20Х13.

Під час експлуатації на лопатки діють високі відцентрові сили, що розтягують її вздовж осі. Тому відповідність регламентним вимогам властивостей сталі у поздовжньому напрямі є визначальною для забезпечення роботоздатності лопаток під час усталеного режиму експлуатації. Перепади тиску пари впливають на тангенціальну складову навантажень на лопатку, і в цьому випадку визначальними стають властивості у поперечному перерізі лопатки. Діаграми навантаження обох варіантів зразків засвідчили збереження запасу пластичності сталі під час деформування лопаток обох орієнтацій. Аналіз визначених характеристик показав, що на поздовжніх зразках вони дещо вищі, ніж на поперечних. Зокрема, значення границі міцності і плинності у двох напрямках відрізнялися на 2 і 7%. Щодо характеристик пластичності, то ефект орієнтації зразків зріс і досяг 14 і 10% (за величиною δ і ψ відповідно). Крім того, всі показники, визначені на поздовжніх зразках, задовольняли вимоги регламенту, а на поперечних – була очевидною втрата запасу пластичності.

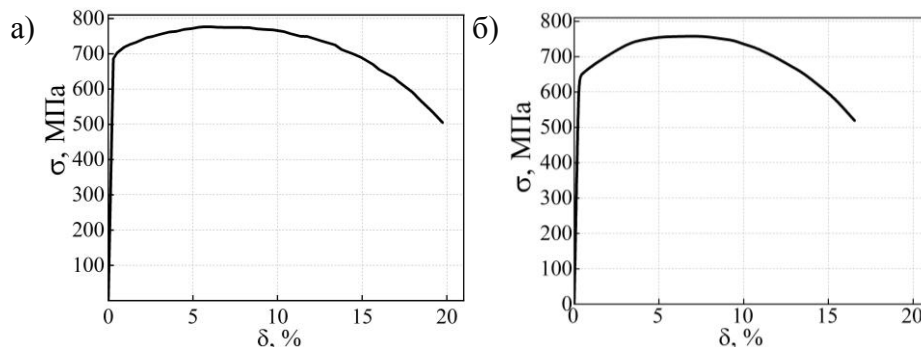


Рисунок 3. Типові діаграми навантаження розтягом в координатах «напруження σ – видовження δ » поздовжнього (а) і поперечного (б) зразків експлуатованої сталі 20Х13.

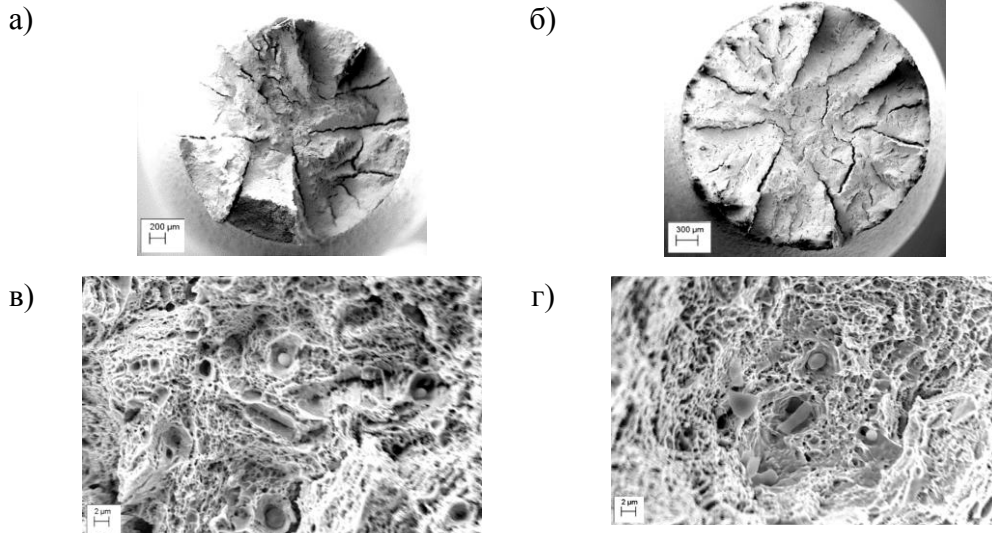
Таблиця – Усереднені значення механічних властивостей за розтягу зразків сталі 20Х13 після $1,2 \cdot 10^5$ год експлуатації в РПТ

Орієнтація зразків	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %
поздовжня	774	690	19,0	66,0
поперечна	759	640	16,4	59,3
Регламентні вимоги	>670	490–655	>18	>50

Відзначили, що зародження дефектів в центральній частині перерізу (відповідає вихідним ділянкам діаграм навантаження) у зразках обох орієнтацій відбулося подібно. Проте з початком локалізації пластичної деформації (за досягнення максимального рівня навантаження) і на етапі поширення пошкоджень на весь переріз зразків (низхідні частини діаграм навантаження) відмінність між ними стала очевидною. Звідси зробили висновок, що опір поширенню пошкоджень, що утворювалися у центральній частині

перерізу поперечних зразків, на весь їх переріз був значно нижчим, ніж на поздовжніх зразках, руйнування яких відбувалося в площині, орієнтованій поперек пера лопатки.

Аналіз зламів зразків обох орієнтацій підтвердив більшу пластичність поздовжніх зразків над поперечними. На обох макрозламах виявили типові ділянки – центральну, де під час розтягу відбулося зародження дефектів у центрі перерізу зразка, та зіркоподібну, що відповідає етапу їх поширення, коли радіально та нормально орієнтовані ділянки (за механізмом зсуву і відриву відповідно) по чергово змінювали одна одну (рис. 4а, б). Конусні частини зламів практично не візуалізувалися, що свідчить про збереження високого опору поширенню руйнування в переважній частині перерізів зразків обох орієнтацій.



Риунок. 4 – Фрактограми поздовжніх (а, в) і поперечних (б, г) зразків сталі 20Х13 з пера лопатки після $1,2 \times 10^5$ год її експлуатації в РПТ, випробуваних за одновісного розтягу.

На мікроскопічному рівні в зразках обох орієнтацій руйнування відбувалося за в'язким ямковим механізмом (рис. 4в, г). Але і в цьому випадку вища рельєфність зламу поздовжнього зразка свідчила про більший запас пластичності сталі (об'ємніші гребені витягування між суміжними порожнинами, ініційованими карбідами у її структурі) за розтягу зразків, орієнтованих вздовж пера лопатки, ніж впоперек неї.

Висновки. Проведене оцінювання механічних властивостей сталі 20Х13 після її тривалої експлуатації в лопатках РПТ виявило втрату нижче вимог регламенту її пластичності на поперечних зразках. Їх руйнування відбувалося вздовж пера лопатки і виявилось чутливим до передісторії формування структури сталі на етапі операції кування лопаток. Їх подальше термічне оброблення не усунула його вплив, а під час високотемпературної експлуатації у наводнювальному середовищі технологічні дефекти розвивались та ослаблювали зв'язки між волокнами структури, спричиненими різною за інтенсивністю пластичною деформацією за різних температур кування.

Дослідження виконано за фінансової підтримки НАН України у межах НДР № 0124U000911.

Перелік посилань

1. Krechkovska H., Hredil M., Student O., Svirsk L., Krechkovska S., Tsybailo I., Solovei P. Peculiarities of fatigue fracture of high-alloyed heat-resistant steel after its operation in steam turbine rotor blades // Int. J. Fatigue. –2023 – 167, Part B. – Art. No.107341. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107341>
2. Nykyforchyn H. M., Tkachuk Yu. M., Student O. Z. In-service degradation of 20Kh13 steel for blades of steam turbines of thermal power plants // Materials Science. – 2011. – 47, 4. – P. 447–456. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9415-z>