

УДК 621.311:621.882.626

## ВІДНОВЛЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОТРИВКОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ПАРОВІЙ ТУРБІНІ

О. З. СТУДЕНТ<sup>1</sup>, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА<sup>1,2</sup>, Л. М. СВІРСЬКА<sup>1</sup>,  
П. Р. СОЛОВЕЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

Проаналізовано особливості руйнування, структуру та механічні властивості тепло-тривкої сталі 25X2M1Ф після  $21 \cdot 10^4$  h експлуатації за жорстких температурно-сило-вих умов роботи елементів кріплення корпусу циліндра високого тиску парової турбіни ТЕС. Оптимізовано режим її повторного термічного оброблення та продемон-стровано відновлення твердості, міцності та пластичності до регламентованих рівнів і, що найважливіше, суттєве підвищення її ударної в'язкості. Таким чином, доведено можливість відновити механічні властивості і продовжити ресурс шпильок після тривалої експлуатації. Побудовано кореляційну залежність між ударною в'язкістю сталі і розміром зерна, яку запропоновано використовувати для діагностування зміни поточного технічного стану металу під час експлуатації.

**Ключові слова:** *теплотривка сталь, структура сталі, механічні властивості, термічне оброблення, відновлення властивостей.*

The fracture features, structure and mechanical properties of 25X2M1Ф heat-resistant steel after  $21 \cdot 10^4$  h of operation in severe temperature-force operation conditions of the fastening elements of the high-pressure cylinder body of a steam turbine of a TPP are analyzed. The mode of the reheat thermal treatment of exploited steel has been optimized. The restoration of hardness, strength and ductility to the regulated levels and, most importantly, a significant increase in its impact toughness is demonstrated. Thus, the ability of restoring the mechanical properties and extending the studs lifetime after their long-term operation has been proved. The correlation dependence between is the impact toughness and the grain size in steel structure is plotted, which proposed to be used to diagnostic the changes in the current technical state of the steel during its long-term operation.

**Keywords:** *heat-resistant steel, steel structure, mechanical properties, reheat thermal treatment, restoration of steel properties.*

**Вступ.** Частина корпусів циліндрів високого, середнього і низького тисків парових турбін ТЕС найчастіше з'єднують елементами кріплення, які демонту-ють під час планових чи вимушених ремонтів [1, 2]. Під час експлуатації на ці елементи діють напруження розтягу та згину, а їх різьба працює на зріз. Високі температура та напруження, а також їх багаторазові навіть незначні коливання впродовж тривалої експлуатації роторів парових турбін можуть сприяти виник-ненню пошкоджень у металі, особливо за впливу водневого чинника [3, 4]. А значний градієнт термічних напружень, пов'язаний із пусками-зупинками тех-нологічного процесу, та конструктивні особливості елементів кріплення (канавки різьби як додаткові концентратори напружень) передбачають високі вимоги до таких сталей. Отже, стабільність властивостей металу таких елементів у часі экс-

платуації є важливим показником їх роботоздатності. Водночас за тривалої експлатуації властивості сталей у різних елементах конструкцій деградують [5–9]. Зокрема, за дії високих і температури, і напружень істотно змінюється і структура [10, 11], і погіршуються механічні характеристики [12–15], що негативно впливатиме на надійність експлатуації сталей, у тому числі в елементах кріплення. Тому актуально вивчити особливості деградації сталей кріпильної арматури після тривалої експлатуації на ТЕС, встановити закономірності зміни їх механічних характеристик та знайти шляхи продовження їх ресурсу.

Мета дослідження – оцінити механічні властивості теплотривкої сталі після тривалої експлатуації в елементі кріплення корпусу циліндра високого тиску (ЦВТ) парової турбіни, обґрунтувати можливість його відновлення та запропонувати метод діагностування поточного технічного стану за розміром зерна.

**Об’єкт та методи випробувань.** Досліджували метал шпильки завдовжки 785 mm з різьбою М86×4, експлатованої  $\sim 21 \cdot 10^4$  h при 450°C в елементі кріплення двох частин корпусу ЦВТ парової турбіни ТЕС. Хімічний склад сталі (mass%: 0,26 С; 2,1 Сг; 0,9 Мо; 0,4 V; 0,3 Ni; 0,31 Si; 0,54 Mn; 0,13 Cu; 0,004 S; 0,027 P) згідно з документом [16] відповідає теплотривкій сталі 25Х2М1Ф. Щоб забезпечити оптимальні механічні характеристики шпильок у вихідному стані, використовують нормалізацію з високим відпуском. Для атестації властивостей сталі застосували: твердість *НВ*, яку заміряли приладом ТК-2 на шліфованій поверхні діаметрального перерізу шпильки; характеристики міцності  $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_{YS}$  та пластичності  $\delta$ ,  $\psi$ , які визначали з діаграм розтягу п’ятикратних гладких циліндричних зразків діаметром 5 mm осьової орієнтації на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформування  $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ; ударну в’язкість *KCU*, встановлену за випроб осьових зразків Менаже на маятниковому копрі ІО-5003. Для металографічних досліджень її структури та фрактографічного аналізу експлатуаційного зламу шпильки, а також зруйнованих зразків використали сканівний електронний мікроскоп EVO-40XVP. За кількісні структурні характеристики прийняли середньоарифметичні значення розмірів зерен  $D_{av}$  та карбідів  $d_{av}$ , розраховані за результатами аналізу не менше десяти цифрових зображень.

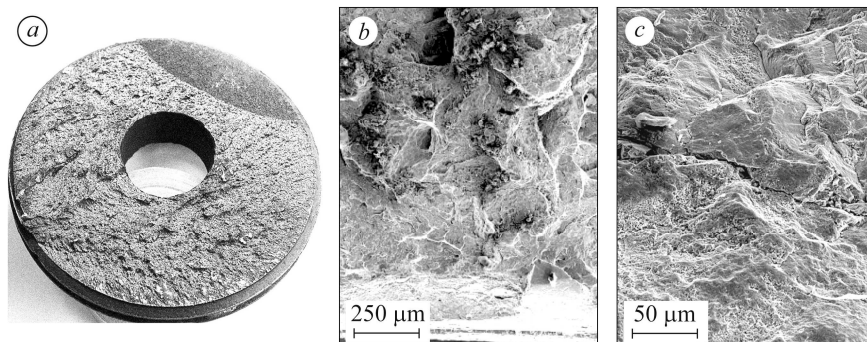


Рис. 1. Макрозлам шпильки, пошкодженої під час тривалої експлатуації в корпусі ЦВТ (а), та мікрофрактограми її зламу на етапі докритичного руйнування (b, c).

Fig. 1. Macrofractogram of the stud fracture surface damaged during long-term operation in the high-pressure cylinder body (a) and micro-fractograms of its fracture at the stage of subcritical fracture (b, c).

**Результати та їх обговорення. Фрактографічний аналіз пошкодженої шпильки.** Її руйнування відбулося під час експлатуації від однієї з канавок різьби як від концентратора напружень унаслідок втоми. На макрозламі шпильки ідентифікували серпоподібну зону докритичного росту втомної тріщини та зону її

неконтрольованого поширення до остаточного руйнування (рис. 1а). Дослідженнями зламу навіть за невисокої роздільної здатності виявили гладку слаборельєфну зону зародження тріщини, характерну для втомного руйнування (знизу на рис. 1b). З її поширенням у глибину перерізу шпильки рельєфність зламу наростала і щораз чіткіше проявлявся зв'язок характерних його ознак зі структурою сталі через появу щораз більшої кількості фрагментів міжзеренного руйнування з ознаками вторинного розтріскування вздовж меж зерен (рис. 1c). Ці фрактографічні ознаки вважали наслідком послаблення когезії між суміжними зернами внаслідок деградації сталі під час тривалої експлуатації.

**Структура експлуатованої сталі.** Тривала високотемпературна експлуатація теплотривких сталей за робочих температури та навантажень спричиняє деградацію їх структури, пов'язану з перерозподілом вуглецю і елементів легування [14, 17–24]. Згідно з даними вхідного контролю на початку експлуатації шпильки структуру сталі класифікували як типову для високовідпущеного мартенситу із характерною пакетною морфологією рейкового мартенситу, яка збереглася після високого відпуску. Натомість, в експлуатованій сталі переважала ферит-карбідна структура (рис. 2а). При цьому більшість зерен фериту мали неправильну форму, а їх розміри змінювалися в діапазоні 60...150 мкм. Карбіди всередині цих зерен були завбільшки до 0,5 мкм, а вздовж меж зерен – до 1...2 мкм. Внаслідок інтенсивного їх виділення уздовж меж зерен та коагуляції знизився вміст елементів легування у твердому розчині, що погіршило опір руйнуванню сталі. Через структурні зміни знижувався опір сталі і зародженню, і поширенню втомної тріщини і, як наслідок, це сприяло руйнуванню шпильки з корпусу ЦВТ парової турбіни ТЕС.

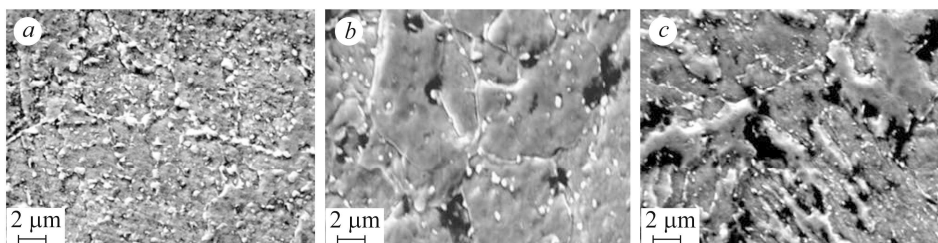


Рис. 2. Структура сталі 25X2M1Ф після експлуатації в шпильці ЦВТ (а) та відновлювального термічного оброблення за режимами 2 (b) та 3 (c).

Fig. 2. Structure of 25X2M1Ф steel after operation as a stud of the high pressure cylinder (a) and after recovery heat treatment in modes 2 (b) and 3 (c).

Оскільки шпильки відносно дорогі елементи кріплення, то продовження їх ресурсу залишається актуальним. Методи неруйнівного контролю дають можливість відбракувати шпильки з тріщиноподібними дефектами, але невідомо, чи відповідають вимогам властивості неушкоджених після тривалої експлуатації шпильок через такі зміни у їх структурі. Тому проаналізували можливості повторного термічного оброблення (ТО) для їх відновлення.

**Відновлювальне термічне оброблення та спричинені ним зміни структури сталі.** Для обґрунтування можливості відновлювати роботоздатність шпильок, зокрема, усунути наслідки експлуатаційної деградації структури сталі (рис. 2а), використали повторне ТО зразків з експлуатованої шпильки. Апробували три режими ТО з нормалізацією від 960°C (1), або 1050°C (2, 3) з додатковою нормалізацією від 960°C (3). Після всіх режимів зразки відпускали при 690°C упродовж 3 h з охолодженням у повітрі. Після ТО за режимом 1 на фоні загалом феритної матриці з зернами неправильної форми в структурі сталі виявили хао-

тично розподілені карбіди завбільшки 1...2  $\mu\text{m}$ . Отже, під час поліморфного перетворення не відбулося повного розчинення карбідів в аустеніті, що перешкодило формуванню рівновісних зерен. Після вищої температури нормалізації (за режимом 2) у структурі з'явилися рівновісні зерна, їх середній розмір зменшився до 59  $\mu\text{m}$ , а діапазон зміни звузився до 30...70  $\mu\text{m}$ . Зменшилися також кількість і розміри карбідів всередині зерен (до 0,3  $\mu\text{m}$ ), але вздовж меж зерен їх кількість майже не змінилася, а розміри зменшилися до  $\sim 1 \mu\text{m}$  (рис. 2b). Найодноріднішу структуру отримали після ТО за режимом 3, коли стабілізувався розмір зерна (40...50  $\mu\text{m}$ ), суттєво знизилася густина карбідів, а їх розміри зменшилися до 0,1 і до 0,3...0,5  $\mu\text{m}$  всередині і вздовж меж зерен відповідно (рис. 2c). Саме ці структурні показники визначили когезію суміжних зерен та вплинули на вміст елементів легування в фериті, від якого залежить високотемпературна втомна і тривала міцність сталі. Тому, аналізуючи структурні зміни в сталі після ТО, дійшли висновку, що саме подвійна нормалізація за режимом 3 мала б забезпечити їй найкращі характеристики.

Середні розміри зерна  $D_{av}$  та карбідів  $d_{av}$  вважають основними структурними характеристиками сталей. Їх визначали традиційним методом січних та використовуючи фрактальний аналіз цифрових зображень [25–27]. Виявили, що за будь-якого режиму відновлювального ТО розміри і зерен, і карбідів у сталі зменшувалися (див. таблицю), але максимально – після подвійної нормалізації за режимом 3. Тут розміри зерен у структурі відновленої сталі зменшилися порівняно з експлуатованою на  $\sim 50\%$ , а карбідів – майже у 4 рази. Внаслідок цього феритна матриця сталі збагатилася елементами легування (Cr та Mo), які перейшли з великих карбідів у твердий розчин, поліпшивши її механічні характеристики (див. таблицю).

#### Механічні та структурні характеристики сталі 25X2M1Ф у вихідному стані, після експлуатації та відновлювального ТО

Стан металу	$\sigma_{UTS}$	$\sigma_{YS}$	$\delta$	$\psi$	$HB$	$KCU$ , MJ/m <sup>2</sup>	$D_{av}$	$d_{av}$	
	MPa		%				$\mu\text{m}$		
Вихідний	812	741	19,0	67,0	260	0,94	52	0,85	
Після 21·10 <sup>4</sup> h експлуатації	917	788	13,8	61,4	249	0,15	81	2,05	
Після відновлювального термічного оброблення	режим 1	620	510	7,5	40,0	160	0,20	70	1,65
	режим 2	953	847	12,3	66,0	252	0,55	59	1,05
	режим 3	870	750	18,8	69,8	267	1,86	39	0,55
Згідно з [RD 10-262-98]	$\geq 785$	667...785	$\geq 17$	$\geq 65$	241...277	0,50	–	–	

#### Механічні характеристики сталі 25X2M1Ф після відновлювального ТО.

Механічні характеристики сталі перед експлуатацією шпильки відповідали регламентованим вимогам [16]. А після експлуатації незначно знизилася твердість і зросли характеристики міцності  $\sigma_{UTS}$  та  $\sigma_{YS}$ , які при цьому все ще задовольняли ці вимоги. Водночас суттєво зменшилися і вийшли за регламентовані межі характеристики її пластичності  $\delta$ ,  $\psi$  (див. таблицю), що особливо небезпечно, оскільки сприяє виникненню пошкоджень. Проте після ТО твердість  $HB$  сталі експлуатованої шпильки спочатку знизилася (за режиму 1), а тоді зросла (після режимів 2 і 3), досягнувши регламентованого рівня. Подібно змінювалися також її характеристики міцності  $\sigma_{UTS}$  та  $\sigma_{YS}$ . Після відновлювального ТО за режимом 1 вони дещо знизилася, а за режимом 2 зросли (причому границя плинності  $\sigma_{YS}$  навіть

вийшла за регламентовані межі [16]). І лише після ТО за режимом 3 отримали не лише задовільні характеристики міцності  $\sigma_{UTS}$  та  $\sigma_{YS}$ , але й пластичності сталі [16], на основі чого його можна було б рекомендувати для відновлення властивостей експлуатованих шпильок. Але для таких відповідальних елементів дуже важлива також здатність металу чинити опір крихкому руйнуванню за ударних навантажень. Проте ударна в'язкість експлуатованої сталі виявилася критично низькою, зменшившись у понад 6 разів проти неексплуатованої, і стала більш ніж утричі нижчою за регламентоване значення  $KCU$  (див. таблицю). Виявилось, що позитивний вплив ТО на значення  $KCU$  експлуатованої сталі наростав у ряду від першого до третього режимів і вже після другого її опір крихкому руйнуванню зріс більш ніж утричі і задовольнив вимоги регламенту, а після подвійної нормалізації за режимом 3 – вдвічі перевищив значення  $KCU$ , притаманне їй ще перед експлуатацією.

Ранжування отриманих характеристик ( $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_{YS}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $HB$ ,  $KCU$ ,  $d_{av}$ ) сталі 25X2M1Ф після експлуатації (рис. 3а) та найефективнішого режиму 3 (рис. 3б) за їх відносною зміною проти відповідних властивостей неексплуатованої демонструє позитивний вплив ТО. Найчіткіше це простежується за впливом на ударну в'язкість, який змінюється з негативного для експлуатованої сталі на позитивний для термічно обробленої (рис. 3).

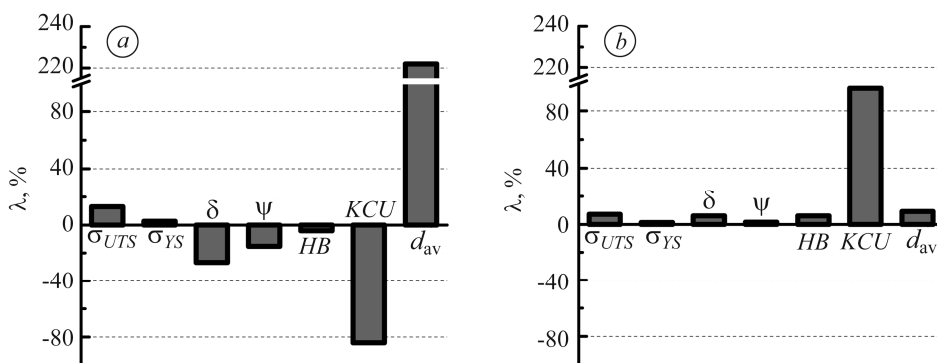


Рис. 3. Ранжування механічних характеристик і розміру карбідів  $d_{av}$  сталі 25X2M1Ф з експлуатованої шпильки (а) та після її відновлювального ТО за режимом 3 (б) порівняно з відповідними характеристиками у вихідному стані.

Fig. 3. Ranking of mechanical characteristics and dimensions of carbides  $d_{av}$  of 25X2M1Ф steel from the exploited stud (a) and after its renovation heat treatment according to mode 3 (b) relative to the corresponding characteristics in the initial state.

Таким чином, візуалізували ефект деградації (зниження характеристик пластичності  $\delta$ ,  $\psi$  і ударної в'язкості  $KCU$  на фоні зростання характеристик міцності  $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_{YS}$  та суттєвого збільшення розміру карбідів  $d_{av}$ , що виділилися вздовж меж зерен, збіднюючи матричну фазу елементами легування) експлуатованої сталі проти неексплуатованої (рис. 3а). Водночас на прикладі ТО за режимом 3 (рис. 3б) проілюстрували ефект відновлення її характеристик, що відчутніше вплинуло на її ударну в'язкість.

Щоб з'ясувати причини протилежного впливу експлуатаційної деградації і відновлювального ТО на ударну в'язкість сталі, проаналізували фрактограми зламів ударних зразків з експлуатованої сталі і після її додаткового ТО за режимом 3. В обох випадках безпосередньо від вершини надрізів виявили в'язкий рельєф, який поширювався відповідно на глибину до 200 і 1300  $\mu\text{m}$ , що корелює із різницею значень  $KCU$  (0,15 і 1,86  $\text{MJ/m}^2$ ) для цих варіантів сталі. Розміри карбідів на дні ямок на зламах корелювали з розмірами, визначеними за результата-

ми металографічних досліджень. Деградація сталі проявилася на зламі суттєвим зерномежовим вторинним розтріскуванням, ознаки якого зафіксували по всій поверхні зламу зразка (рис. 4a). Вторинні тріщини чітко окреслювали фасетки кризьеренного відколу в окремих зернах і їх конгломератів, що особливо проявилася на ділянці спонтанного поширення руйнування. Їх вважали ознакою ослаблення когезії між суміжними зернами, спричиненої тривалою високотемпературною експлуатацією сталі. Разом з тим на зламі зразка після ТО ознак вторинного розтріскування практично не було. У зоні доламу переважали фасетки кризьеренного відколу, перемежовані вузькими прошарками в'язкого дрібнодисперсного ямкового рельєфу (рис. 4b), що узгоджується зі встановленим металографічно подрібненням карбідів після ТО. Отже, можна стверджувати, що повторне ТО відновило зв'язки між суміжними зернами, що посприяло зростанню опору крихкому руйнуванню експлуатованої сталі.

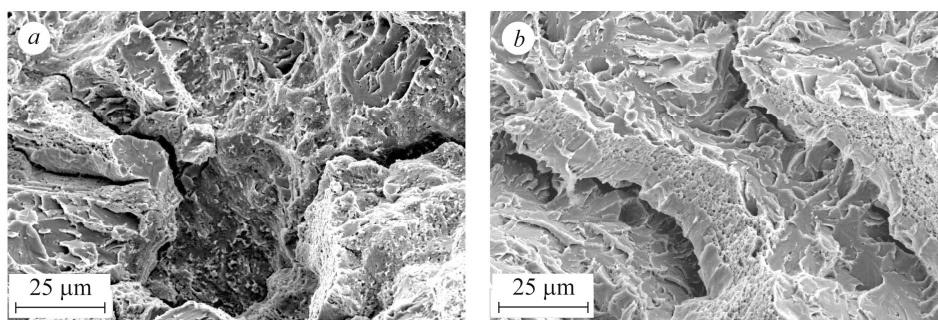


Рис. 4. Фрактограми ударних зразків сталі 25X2M1Φ після  $21 \cdot 10^4$  h експлуатації в шпильці корпусу ЦВТ (a) і додаткового термічного оброблення за режимом 3 (b).

Fig. 4. Fractograms of impact specimens of the 25X2M1Φ steel after  $21 \cdot 10^4$  h of operation in the stud of the HPC body (a) and after additional heat treatment according to mode 3 (b).

Оскільки максимальний вплив і експлуатаційної деградації, і відновлювального ТО виявили за випроб на ударну в'язкість та встановили її залежність від структурних характеристик сталі, то логічно сподіватися на кореляцію цих показників. Адже механічні характеристики сталі з найбільшими середніми розмірами зерен  $D_{av}$  і карбідів  $d_{av}$  у структурі були найгіршими, і, відповідно, з найменшими – найкращими. З урахуванням можливостей лабораторій металів на ТЕС, які, як правило, використовують лише оптичну мікроскопію (що обмежує надійний аналіз розмірів карбідів), побудували кореляційну залежність  $KCU-D_{av}^{-1/2}$  (рис. 5).

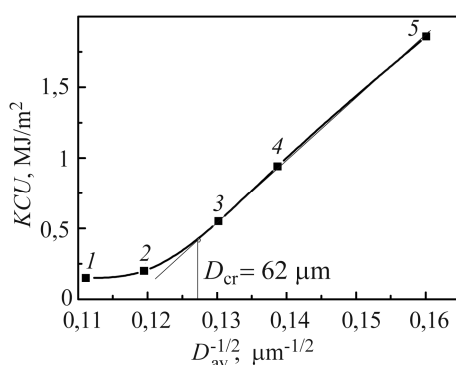


Рис. 5. Кореляційна залежність між ударною в'язкістю  $KCU$  та розміром зерна  $D_{av}$  сталі 25X2M1Φ: 1 – експлуатована; 2, 3, 5 – після додаткового ТО за режимами 1, 2 і 3; 4 – у вихідному стані.

Fig. 5. Correlation dependence between impact toughness  $KCU$  and grain size  $D_{av}$  for 25X2M1Φ steel: 1 – after service; 2, 3, 5 – additional heat treatment according to regimes 1, 2 and 3; 4 – in the initial state.

Отримали практично пряму залежність між аналізованими показниками за зміни розміру зерна аж до значення  $D_{av} = 62 \mu\text{m}$ , яке вважали за критичне  $D_{cr}$ . Адже, по-перше, починаючи з нього на цій залежності вплив подальшого зрос-

тання розміру зерна в експлуатованій сталі на зниження її опору крихкому руйнуванню нівелювався через зростання ролі вторинного розтріскування, зумовленого зниженням когезії між суміжними зернами. Множинне галуження тріщини сприяло релаксації напружень у вершині ростучої тріщини, уповільнюючи її поширення, що (як і в праці [28]) нівелювало ефект зниження  $KCU$  зі збільшенням значення  $D$ . А, по-друге, згідно з отриманою залежністю значення  $KCU$  в точці, яка відповідає величині  $D_{cr}$ , майже узгоджується із регламентованим для цієї сталі ( $0,5 \text{ MJ/m}^2$ ). Зауважили також, що навіть другий з використаних режимів ТО незначно поліпшив стан металу, а після третього вдалося не лише відновити початкові властивості тривало експлуатованої сталі, але ще й суттєво поліпшити їх.

Отже, двостадійною нормалізацією сталі з експлуатованої шпильки отримали рівномірну структуру з рівновісними і найменшими за розмірами зернами та з найдрібнішими карбідами, що повністю забезпечило відновлення її механічних характеристик і їх відповідність вимогам регламенту. Цим обґрунтували можливість продовжити ресурс шпильок (після неруйнівного контролю на відсутність у них тріщин).

### ВИСНОВКИ

Виявлено структурні ознаки деградації сталі 25X2M1Ф після  $\sim 21 \cdot 10^4$  h експлуатації в шпильці корпусу ЦВТ парової турбіни ТЕС: суттєве зростання розміру зерен та інтенсивне виділення карбідів з їх коагуляцією вздовж меж зерен, що зумовило зниження когезії між суміжними зернами. Попри незначне зростання характеристик міцності, пластичність і ударна в'язкість експлуатованої сталі знизилися настільки, що не відповідали вимогам регламенту. Обґрунтовано можливість використання двостадійної нормалізації (від 1050 і 960°C) з подальшим високотемпературним відпуском при 690°C експлуатованої сталі для відновлення її механічних характеристик до значень, значно вищих, ніж регламентовані для елементів кріпильної арматури у вихідному стані. Так доведено доцільність термічного оброблення для продовження ресурсу експлуатованих шпильок, якщо неруйнівним контролем в них не виявлено тріщиноподібних дефектів. Побудовано кореляційну залежність між структурною (розмір зерна) і механічною (ударна в'язкість  $KCU$ ) характеристиками сталі, обґрунтовано критичний розмір зерна, за якого досягається мінімальне допустиме значення  $KCU$ . Це дає можливість неруйнівним методом (за розміром зерна на поверхні шпильок) прогнозувати опір крихкому руйнуванню тривало експлуатованої сталі і приймати рішення про потребу в її відновлюванні з використанням повторного термічного оброблення.

1. *Laxminarayan K., Venkatarama Reddy M., and K. Kumar P.* Contact pressure of steam turbine casing for static loading condition // *Int. J. Modern. Eng. Research.* – 2013. – **3**, № 5. – P. 2888–2893.
2. *Dhanush Naik J. B. and Kiran Kumar P.* Contact pressure analysis of steam turbine casing // *Int. Research J. Eng. Techn.* – 2017. – **4**, № 6. – P. 909–913.
3. *Сміян О. Д., Студент О. З.* Фрактографічні ознаки гігациклової втоми та наводнювання за експлуатації теплотривких сталей // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2020. – **56**, № 6. – С. 5–15.
4. *Dmytrakh I. M., Smiyan O. D., and Syrotyuk A. M.* Experimental study of fatigue crack growth in pipeline steel under hydrogenating conditions // *Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale: Proc. 18<sup>th</sup> Eur. Conf. Fracture, ECF-18, 30.08–03.09.2010, Dresden (Germany), 2010.* – 8 p.
5. *Features of the microstructural and mechanical degradation of long term operated mild steel / O. Student, H. Krechkovska, G. Lesiuk, J. Correia // Int. J. Structural Integrity.* – 2018. – **9**, № 3. – P. 296–306.
6. *Relationships between the fatigue crack growth resistance characteristics of a steel and the tread surface damage of railway wheel / O. P. Ostash, V. V. Kulyk, T. M. Lenkovskiy,*

- Z. A. Duriagina, V. V. Vira, and T. L. Tepla // Arch. Mater. Sci. Eng. – 2018. – **90**, № 2. – P. 49–55.
7. *Degradation Theory of Long Term Operated Materials and Structures* / G. Lesiuk, J. A. F. O. Correia, H. V. Krechkovska, G. Pekalski, A. M. P. Jesus, O. Z. Student. – Springer: Structural Integrity, 2021. – V. 15. – 170 p.
  8. *Вплив гальмування на мікроструктуру і механічну поведінку сталей залізничних коліс* / О. П. Остап, І. М. Андрейко, В. В. Кулик, В. І. Ваврух // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 5. – С. 15–20.  
(*Influence of braking on the microstructure and mechanical behavior of railroad wheel steels* / O. P. Ostash, I. M. Andreiko, V. V. Kulyk, V. I. Vavruk // Materials Science. – 2013. – **48**, № 5. – P. 569–574.)
  9. *Study of the fatigue crack growth in long-term operated mild steel under mixed-mode (I + II, I + III) loading conditions* / G. Lesiuk, M. Smolnicki, D. Rozumek, H. Krechkovska, O. Student, J. Correia, R. Mech and A. De Jesus // Materials. – 2020. – **13**. P. 160–171.
  10. *Krechkovska G. V. Structural changes in exploitation of steam power plant pipeline 15Kh1M1F-type steel concerning with shut downs of power units* // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2008. – **30**, Spec. Is. – P. 701–711.
  11. *Zheng-Fei Hu. Chapter 10 – Heat-resistant steels, microstructure evolution and life assessment in power plants, thermal power plants* // Thermal Power Plants / Ed. M. Rassul. – London: IntechOpen Limited, 2012. – P. 195–226.
  12. *Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ гинів головних парогонів ТЕС на її механічні властивості* / О. З. Студент, Г. В. Кречковська, Т. Є. Палашук, Я. М. Гладкий // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 4. – С. 34–41.  
(*Influence of the long-term operation of 12Kh1MF steel of the bends of main steam pipelines of thermal power plants on its mechanical properties* / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, T. E. Palashchuk, Ya. M. Hladkyi // Materials Science. – 2018. – **53**, № 4. – P. 460–467.)
  13. *Svirska L. Serviceability restoration of operating fastening elements of the high pressure cylinder body of HPP steam turbine* // Вісник Тернопільськ. нац. техн. ун-ту. – 2019. – № 1 (93). – С. 32–40.
  14. *Кречковська Г. В., Студент О. З., Никуфорчин Г. М. Діагностування технічного стану парогонів ТЕС за твердістю і тріщиностійкістю сталі* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 5. – С. 22–32.  
(*Krechkovska H. V., Student O. Z., and Nykyforchyn H. M. Diagnostics of the engineering state of steam pipelines of thermal power plants by the hardness and crack resistance of steel* // Materials Science. – 2019. – **54**, № 5. – P. 627–637.)
  15. *Кречковська Г. В. Фрактографічні ознаки механізмів транспортування водню в конструкційних сталях* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, №4. – С. 67–70.  
(*Krechkovska H. V. Fractographic signs of the mechanisms of transportation of hydrogen in structural steels* // Materials Science. – 2016. – **51**, 4. – P. 509–513.)
  16. *РД 10-262-98 (РД 153-34.1-17.421-98). Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.* – М.: РАО “ЕЭС России”, 1999. – 94 с.
  17. *Effect of thermal ageing on the evolution of microstructure and degradation of hardness of 2.25 Cr–1Mo steel* / B. B. Jha, B. K. Mishra, B. Satpati, S. N. Ojha // Mat. Sci. (Poland). – 2010. – **28**, № 1. – P. 335–346.
  18. *Jha B. B., Mishra B. K., and Ojha S. N. Effect of microstructural variation on hardness degradation of 2.25Cr–1Mo steel and its impact on residual life assessment* // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2010. – **49**, № 3. – P. 293–300.
  19. *Effect of ageing on the microstructural evolution in a new design of maraging steels with carbon* // P. Gong, B. P. Wynne, A. J. Knowles, A. Turk, Le Ma, E. I. G. Nava, W. M. Rainforth // Acta Materialia. – 2020. – **196**. – P. 101–121.
  20. *Zieliński A. and Dobrzański J. Characteristics of changes in properties and structure of X10CrMoVNb9-1 steel due to long-term impact of temperature and stress* // Arch. Mater. Sci. Eng. – 2013. – **60**, № 2. – P. 72–81.



21. *Дзіоба І. Р.* Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 3. – С. 65–72.  
(*Dzioba I. R.* Properties of 13KhMF steel after operation and degradation under the laboratory conditions // *Materials Science*. – 2010. – **46**, № 3. – P. 357–364.)
22. *Оцінювання деградації сталей парогонів за їх структурними, механічними та електрохімічними характеристиками / О. П. Осташ, О. В. Вольдемаров, П. В. Гладиш, А. Д. Івашишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 4. – С. 5–12.*  
(*Evaluation of the degradation of steels of steam pipelines according to their structural, mechanical, and electrochemical characteristics / O. P. Ostash, O. V. Vol'demarov, P. V. Hladysh, A. D. Ivasyshyn // Materials Science*. – 2011. – **46**, № 4. – P. 431–439.)
23. *Студент О. З., Свірська Л. М., Дзіоба І. Р.* Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1М1Ф з різних зон гину парогону ТЕС на її механічні характеристики // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 2. – С. 111–118.  
(*Student O. Z., Svirs'ka L. M., and Dzioba I. R.* Influence of the long-term operation of 12Kh1M1F steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics // *Materials Science*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 239–246.)
24. *Студент О. З., Кречковська Г. В.* Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15Х1М1Ф після її експлуатації на парогоні ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 5. – С. 19–26.  
(*Student O. Z. and Krechkovs'ka H. V.* Anisotropy of the mechanical properties of degraded 15Kh1M1F steel after its operation in steam pipelines of thermal power plants // *Materials Science*. – 2012. – **47**, № 5. – P. 590–597.)
25. *Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О. З. Студент, Б. П. Русин, Б. В. Кисіль, М. І. Кобасяр, Т. П. Стахів, А. Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – 39, № 1. – С. 22–28.*  
(*Quantitative analysis of structural changes in steel caused by high-temperature holding in hydrogen / O. Z. Student, B. P. Rusyn, B. P. Kysil', M. I. Kobasyar, T. P. Stakhiv, A. D. Markov // Materials Science*. – 2003. – **39**, № 1. – P. 17–24.)
26. *Автоматичне виділення та кількісний аналіз карбідів на межах зерен сталі 12Х1МФ після експлуатації на парогоні ТЕС / Р. А. Воробель, І. М. Журавель, Л. М. Свірська, О. З. Студент // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 3. – С. 109–115.*  
(*Automatic selection and quantitative analysis of carbides on grain boundaries of 12Kh1MF steel after operation at a steam pipeline of a thermal power plant / R. A. Vorobel', I. M. Zhuravel', L. M. Svirs'ka, O. Z. Student // Materials Science*. – 2011. – **47**, № 3. – P. 393–400.)
27. *Журавель І. М., Свірська Л. М.* Вимірювання усередненого розміру зерен металу з використанням фрактальної розмірності // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 3. – С. 126–128.  
(*Zhuravel' I. M. and Svirs'ka L. M.* Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions // *Materials Science*. – 2010. – **46**, № 3. – P. 418–420.)
28. *Вплив текстури експлуатованих сталей газопроводів на їх опір крихкому руйнуванню / О. І. Звірко, Н. В. Крет, О. Т. Цирульник, Т. П. Венгринюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – 54, № 3. – С. 101–106.*  
(*Influence of textures of pipeline steels after operation on their brittle fracture resistance // O. I. Zvirko, N. V. Kret, O. T. Tsyrunyk, T. P. Vengrynyuk // Materials Science*. – 2018. – **54**, № 3. – P. 400–405.)

Одержано 21.10.2020