

УДК 621.325:669.539.43

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО НАВОДНЮВАННЯ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНОЇ ТЕПЛОТРИВКОЇ СТАЛІ ПАРОГОНІВ ТЕС

І. О. ЦИБАЙЛО¹, Л. М. СВІРСЬКА¹, П. Р. СОЛОВЕЙ^{1,2},
С. Р. КРЕЧКОВСЬКА², Б. М. ДАЦКО¹, О. З. СТУДЕНТ¹

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

² Національний університет "Львівська політехніка"

Встановлено, що ефект деградації теплотривкої сталі парогонів ТЕС чіткіше проявляється за додаткового наводнювання. На зразках осьової орієнтації її негативний вплив слабший в околі зовнішньої поверхні труби та посилюється поблизу внутрішньої. Зростання видовження зразків пов'язали із розкриттям експлуатаційних дефектів під дією водню. На зразках тангенціальної орієнтації його фіксували лише біля внутрішньої поверхні труби. За розтягу радіальних зразків розкривалися експлуатаційні дефекти, зумовлені розшаруваннями вздовж текстури вальцювання. Фрактографічний аналіз наводнених зразків металу засвідчив велику кількість відшарованих від матриці неметалевих включень з лінзоподібними плитками ямками навколо них, перетинки між якими руйнувалися за механізмом зсуву. Крім того, в металі труб з більшою кількістю зупинок були ділянки крізьзеренного відколу, які вважали фрактографічною ознакою окрихчувальної дії внутрішнього водню, сукупно абсорбованого сталлю і під час експлуатації на парогоні, і під час електролітичного наводнювання.

Ключові слова: *теплотривка сталь, руйнування, деградація, наводнювання.*

It was established that the effect of degradation of heat-resistant steel of TPP steam pipelines is more clearly manifested after its additional hydrogenation. On specimens of axial orientation, the negative effect of degradation was weaker near the outer surface of the pipe and increased as it approached its inner surface. An increase in the elongation of specimens was considered to be a consequence of the operational defects under the influence of hydrogenation. It was recorded only near the inner pipe surface of tangential orientated specimens and caused by defects in its diametrical section as a result of thermal fatigue. Testing of radial specimens made it possible to reveal operational defects caused by delaminations along the rolling texture. Fractographic analysis of specimens of hydrogenated steel demonstrated a large number of non-metallic inclusions delaminated from the matrix with lenticular flat fragments around them, formed due to shear fracture mechanism. In addition, areas of transgranular cleavage were recorded in the metal of pipes with a large number of shutdowns. These areas were considered as a fractographic sign of the embrittlement effect of internal hydrogen, cumulatively absorbed by steel both during operation on steam pipes and during electrolytic hydrogenating.

Keywords: *heat-resistant steel, fracture, degradation, hydrogenation.*

Вступ. Головні парогони теплоелектростанцій (ТЕС) – це протяжна система об'єднаних в одну мережу прямих і зігнутих товстостінних труб. До основних чинників, які спричиняють втрату початкової роботоздатності їх сталей, відносять робочі температуру (до 570°C), тиск середовища (до 24 МПа), тривалість їх експлуатації (яка перевищує $3 \cdot 10^5$ h) [1], кількість зупинок технологічного процесу з охолодженням системи парогонів та складний напружено-деформований стан

у стінці труб [2, 3]. Довгочасний вплив таких чинників сприяє деградації мікроструктури сталей [4–9]. Під час експлуатації в теплотривких сталях відбуваються перерозподіл карбідів на межі зерен та їх коагуляція. Поле деформацій навколо них послаблює їх зв'язок з матрицею [6]. Через пружну невідповідність з матрицею карбіди безпосередньо впливають на деформацію в локальних зонах їх розмежування [10]. Все це сприяє міжзеренному пороутворенню, послаблює когезію суміжних зерен і, як наслідок, полегшує руйнування елементів конструкцій через повзучість (особливо за впливу наводнювання [11, 12]) та термовтому від зупинок технологічного процесу [3, 13]. На робоздатність експлуатованих сталей, крім того, суттєво впливає їх наводнювання з робочого середовища [14], яке може інтенсифікувати структурні перетворення, пришвидшуючи дифузію вуглецю і елементів легування [15–18] та виділення карбідів уздовж меж зерен, що спричинятиме внутрішнє уповільнене руйнування на мікроструктурному рівні.

Як правило, механічні характеристики за розтягу у повітрі недостатньо чутливо віддзеркалюють деградацію сталей внаслідок тривалої експлуатації [19]. Натомість, їх чутливість до деградації відчутно зростає через наводнювання металу під час функціонування парогонів [14, 20]. Вважали, що наводнюванням можна підвищити чутливість до деградації традиційних характеристик експлуатованих сталей за розтягу.

Матеріали та методи випроб. Досліджували теплотривку сталь 15X1M1Ф (mass%: 0,14 C; 1,3 Cr; 1,0 Mo; 0,75 Mn; 0,1 Ni; 0,3 Si; 0,25 V; 0,012 S; 0,027 P) у вихідному стані (з труб запасу) та після $\sim 2 \cdot 10^5$ h експлуатації за температури до 545°C і тиску до 24 МПа на головних парогонях ТЕС. За однакової тривалості експлуатації метал з блоків № 1 та № 2 відрізнявся за кількістю зупинок технологічного процесу, загальна кількість яких становила 501 і 576, а вимушених – 219 і 283 для сталі з першого та другого блоків, відповідно.

Випробовували зразки осьової та тангенціальної орієнтацій, розташовані на віддалі 10; 30 та 52 mm від зовнішньої поверхні труб, а також радіальні (товщина стінки труби 60 mm). Технічний стан деградованого металу оцінювали за стандартними механічними характеристиками під час розтягу гладких циліндричних зразків діаметром 5 mm і довжиною робочої частини 25 mm на машині УМЕ-10Т за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Щоб унеможливити вплив дефектів оброблення поверхні, робочу частину зразків полірували матеріалами різної зернистості. Механічні характеристики сталі визначали за випроб зразків у повітрі (без і після попереднього наводнювання). Зразки електролітично наводнювали 15 min у 5% розчині H_2SO_4 (рН 0) з додаванням 2 g/l тіосечовини за густини струму 50 mA/sm². Так підсилювали можливий вплив внутрішнього водню, абсорбованого металом під час попередньої експлуатації. За довірчої імовірності 0,95 і до п'яти випроб на розтяг відносна похибка визначення характеристик міцності та пластичності не перевищувала 2...3%. Для фрактографічних досліджень застосували електронний мікроскоп ZEISS EVO 40XVP.

Результати випроб. Сталь 15X1M1Ф випробували у вихідному стані та після експлуатації з попереднім електролітичним наводнюванням перед розтягом у повітрі. Вважали, що наводнювання сприятиме розкриттю утворених дефектів [21]. Аналізували відносну зміну характеристик міцності і пластичності зразків осьової, тангенціальної та радіальної орієнтацій, вирізаних на різних рівнях по товщині стінки труб аналізованих парогонів (рис. 1).

За випроб у повітрі без додаткового наводнювання характеристики міцності, визначені на осьових та тангенціальних зразках, знижувалися в напрямі від зовнішньої до внутрішньої поверхонь труб [19, 22]. Попереднім наводнюванням вдалося чіткіше виявити їх падіння, причому незалежно від орієнтації зразків та їх розташування по товщині стінки труб (рис. 1). Після наводнювання додатково

знизилося відносно звуження RA деградованого металу незалежно від орієнтації зразків та розташування в перерізі труб. Особливо різоче це проявилось на зразках радіальної орієнтації (рис. 2). Якщо без наводнювання сталі з блоку № 2 зниження RA становило 42%, то після наводнювання досягло 71%. Для сталі з блоку № 1 під впливом наводнювання воно знизилося на 56%, порівняно з 28% без нього.

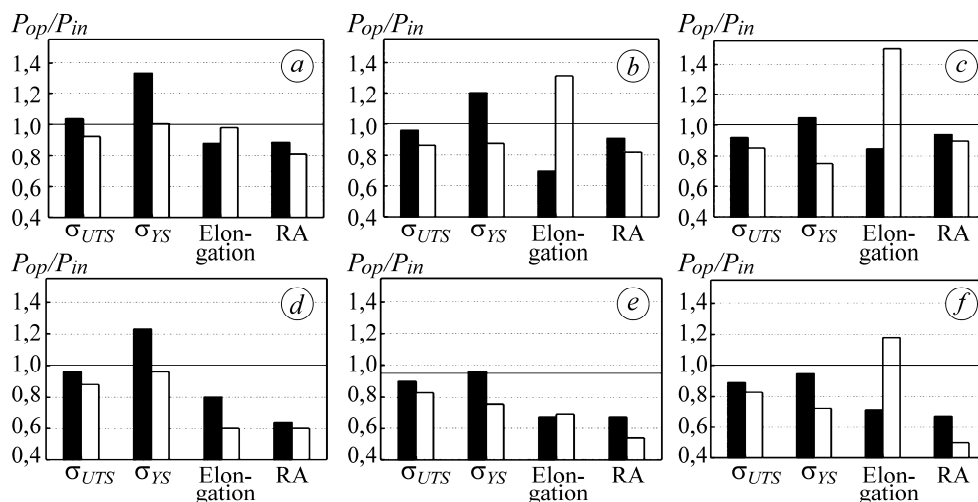


Рис. 1. Відносна зміна границь міцності (σ_{UTS}) і плинності (σ_{YS}), відносних звуження (RA) і видовження (Elongation), встановлених за розтягу у повітрі зразків осьової (a–c) та тангенціальної (d–f) орієнтацій, розташованих на віддалі 10 (a, d); 30 (b, e); 52 mm (c, f) від зовнішньої поверхні труб, визначені на попередньо електролітично наводнених зразках сталі 15X1M1Ф, експлуатованої (P_{op}) на блоках № 1 (чорні стовпчики) та № 2 (білі) порівняно з відповідними її характеристиками у вихідному стані (P_{in}).

Fig. 1. Relative change in tensile strength (σ_{UTS}) and yield strength (σ_{YS}), reduction of area (RA) and elongation, determined during tensile tests in air of specimens of axial (a–c) and tangential (d–f) orientations cut at a distance of 10 (a, d); 30 (b, e); 52 mm (c, f) from the outer surface of the pipes. The P values were evaluated on preliminary hydrogenated specimens of 15X1M1Ф steel, operated (P_{op}) on blocks № 1 (black bars) and № 2 (white) in comparison with the corresponding characteristics of steel in the initial state (P_{in}).

Після попереднього наводнювання відносно видовження зразків металу блоку № 1 суттєвіше зменшилося в центрі перерізу і біля внутрішньої поверхні труби, причому за обох орієнтацій зразків (див. рис. 1). Тоді як для сталі з більшою кількістю зупинок для зразків осьової орієнтації збільшилося практично в усьому перерізі труби (рис. 1a–c), що може бути ознакою полегшеного під впливом водню розкриття дефектів, що виникли під час експлуатації. При цьому зростання відносного видовження зразків тангенціальної орієнтації після наводнювання зафіксували лише біля внутрішньої поверхні труб (рис. 1d–f). Загалом абсорбований металом блоку № 2 водень майже в усьому перерізі труби зменшував видовження тангенціальних зразків.

За радіальної орієнтації наводнених зразків відносно видовження сталі блоку № 2 знизилося більш ніж на 63% (рис. 2b), тоді як без наводнювання спостерігали хоч і незначне (на 10%), але його підвищення після експлуатації (рис. 2a). Отже, полегшення розкриття дефектів в експлуатованому металі під впливом внутрішнього водню залежить не лише від його технічного стану (проявилось на сталі з більшою кількістю зупинок), але і від орієнтації зразків, що вказувало на існування у стінці труб діаметрально орієнтованих дефектів. Їх виникнення могла спричинити термічна втома під час зупинок блоку. Адже дефекти повзучості переважно мають осьову орієнтацію і тому повинні би додатково розкриватися і

підвищувати показник пластичності (elongation), визначений на тангенціальних зразках. Водночас, оскільки їх вплив можна знехтувати, то основну роль у зростанні відносного видовження відіграли саме дефекти від термічної втоми.

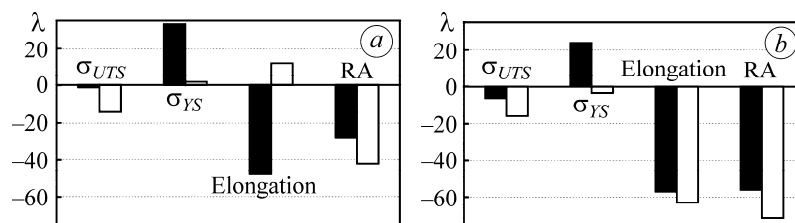


Рис. 2. Відносна зміна λ границь міцності (σ_{UTS}) та плинності (σ_{YS}), відносних видовження (Elongation) та звуження (RA), визначених за випроб розтягом у повітрі зразків радіальної орієнтації без (a) та після попереднього наводнювання (b), вирізаних із труб, експлуатованих на блоках № 1 (чорні стовпчики) і № 2 (білі); $\lambda = (P_{op} - P_{in}) / P_{in} \cdot 100\%$.

Fig. 2. Relative change λ in tensile strength (σ_{UTS}) and yield strength (σ_{YS}) and relative elongation and compression (RA) determined during tensile tests in air of specimens of radial orientation without (a) and after preliminary hydrogenation (b) cut from pipes operated on blocks № 1 (black bars) and № 2 (white); $\lambda = (P_{op} - P_{in}) / P_{in} \cdot 100\%$.

Урахували те, що руйнування осевих зразків відбувалося у поперечному перерізі труб, що відповідало площині поширення колових тріщин від термічної втоми. Тоді як поверхня зламу тангенціальних зразків збігалась з орієнтацією осевих тріщин повзучості в трубах, а радіальних – давала змогу розкривати дефекти, зумовлені розшаруваннями вздовж структурних ознак, спричинених вальцюванням. Тому для фрактографічних досліджень обрали саме радіальні зразки.

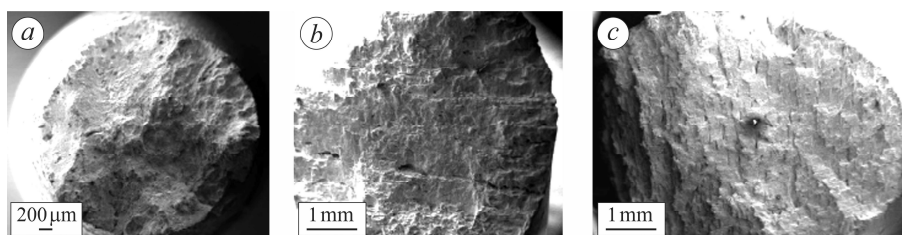


Рис. 3. Макрофрактограми сталі 15X1M1Φ у вихідному стані (a) та після експлуатації на блоках № 1 (b) і 2 (c), отримані на зразках радіальної орієнтації, випробуваних розтягом у повітрі після попереднього електролітичного наводнювання.

Fig. 3. Macrofractograms of steel 15X1M1Φ in the initial state (a) and after its operation on blocks № 1 (b) and 2 (c), obtained in the central part of the fracture surfaces of specimens of radial orientation, tensile tested in air, after their preliminary electrolytic hydrogenation.

Макрозлами радіальних зразків у вихідному стані після наводнювання залишались нормально орієнтованими до напрямку дії прикладених ззовні напружень (рис. 3a), тоді як експлуатованій сталі блоків № 1 і 2 були нахилені до нього під кутами 59° і 45° , відповідно. Щоб забезпечити необхідну глибину різкості зображення, злами нахилили в колоні мікроскопа, через що на знімках вони овальні (рис. 3b, c). За впливу попереднього наводнювання текстура зламів (на рис. 3b зліва направо для сталі з блоку № 1 і на рис. 3c зверху вниз для сталі з блоку № 2) проявилася ще чіткіше, ніж без його впливу. Зрозуміло, що чим більший кут нахилу зламів до осі зразків, то більша частина їх робочої довжини потрапляла в зону процесу під час активного деформування, а отже, більше дефектів від розсіяної пошкодженості сталі під час експлуатації опинялася в зоні деформування та руйнування зразків.

Мікрофрактографічний аналіз центральної частини зламів попередньо наводнених зразків сталі у вихідному стані виявив їх типовий рельєф з в'язких ямок, сформованих за механізмом відриву (рис. 4а). На зламах експлуатованої сталі при цьому було багато плитких лінзоподібних ямок з відшарованими від матриці неметалевими включеннями (або їх слідами) по центру (рис. 4с–е). Рельєф їх поверхні формувався за механізмом зсуву. Цю фрактографічну особливість пов'язали з деградацією сталі, оскільки саме ділянки зсуву спричинили косий злам (див. рис. 3). Крім того, на зламах експлуатованої за більшої кількості зупинок (блок № 2) сталі, навіть у центральній частині зламу фіксували округлі ділянки крізьзеренного відколу (рис. 4ф), чого не було за відсутності попереднього електролітичного наводнення. Ці ділянки вважали фрактографічною ознакою окрихчувальної дії внутрішнього водню, абсорбованого сталлю і під час експлуатації на парогоннах, і під час електролітичного наводнення.

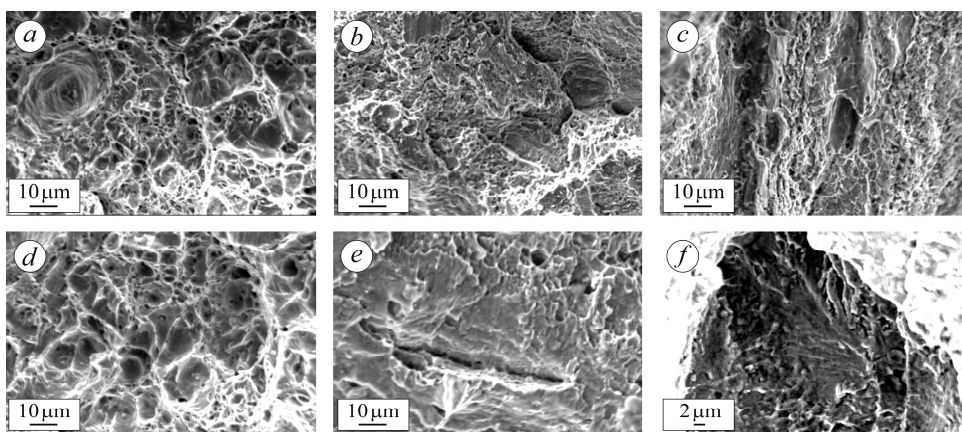


Рис. 4. Мікрофрактограми сталі 15X1M1Φ у вихідному стані (а, б) та після експлуатації на блоках № 1 (с, д) і 2 (е, ф), отримані в центральній частині зламів зразків радіальної орієнтації, випробуваних розтягом у повітрі після попереднього наводнення.

Fig. 4. Microfractograms of 15X1M1Φ steel in the initial state (a, b) and after its operation on blocks № 1 (c, d) and 2 (e, f), obtained in the central part of the fracture surfaces of specimens of radial orientation, tensile tested in air, after their preliminary hydrogenation.

З наближенням до бічної поверхні наводнених зразків подібні ознаки окрихчення внутрішнім воднем фіксували щораз частіше (рис. 5), зокрема, як поодинокі крихкі елементи крізьзеренного відколу навіть на зламі сталі у вихідному стані (рис. 5а, б). У цьому випадку гребені відриву на фасетках відколу мали ознаки значного пластичного деформування (рис. 5б). Проте кількість фрагментів крізьзеренного відколу була більшою на зламі сталі з блоку № 1 (рис. 5с, д), а найбільшою – з блоку № 2 (рис. 5е–і). Осередками зародження відколів були сульфід марганцю (рис. 5с) та пошкодження на межах зерен (рис. 5д). Загалом формування відколів від сульфідів марганцю типове для сталі з блоку № 2 (рис. 5е, ф). Перетинки між утвореними при цьому еліпсоподібними тріщинами руйнувалися за механізмом зсуву.

Характерним фрактографічним елементом зламів сталі з блоку № 2 була значна кількість доволі великих (площею від 100 до 500 μm²) фрагментів міжзеренного руйнування, розпорошених у поперечному перерізі зразків (рис. 5г). Їх вважали візуалізованими експлуатаційними пошкодженнями внаслідок повзучості металу у стінці труби. Під час навантаження зразка розтягом від цих міжзеренних дефектів під впливом накопиченого в них водню руйнування поширювалося за механізмом крізьзеренного відколу (рис. 5h).

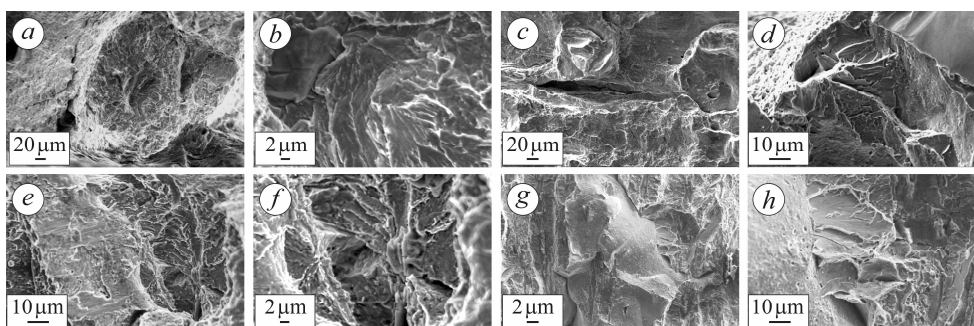


Рис. 5. Мікрофрактограми сталі 15X1M1Φ у вихідному стані (*a, b*) та після експлуатації на блоках № 1 (*c, d*) та 2 (*e-h*), отримані на глибині до 1,5 mm від зовнішньої поверхні зразків радіальної орієнтації, випробуваних розтягом у повітрі після попереднього електролітичного наводнювання.

Fig. 5. Microfractograms of 15X1M1Φ steel in the initial state (*a, b*) and after its operation on the blocks № 1 (*c, d*) and 2 (*e-h*), obtained at a depth of up to 1.5 mm from the outer surface of the specimens of radial orientation, tensile tested in air after preliminary electrolytic hydrogenation.

Таким чином, внутрішній водень, абсорбований сталлю під час електролітичного наводнювання, сприяє кризьзеренному розтріскуванню від сульфідів марганцю та експлуатаційних міжзеренних дефектів. Міжзеренні фрагменти на зламах експлуатованої сталі вважали пошкодженнями через повзучість під час експлуатації. Адже в неексплуатованій сталі їх не фіксували, а розміри та кількість були значно меншими після меншої кількості зупинок технологічного процесу (сталь з блоку № 1), ніж після більшої (сталь з блоку № 2).

ВИСНОВКИ

Попереднє електролітичне наводнювання чіткіше виявляє наслідки експлуатаційної деградації (особливо після більшої кількості зупинок технологічного процесу) сталі 15X1M1Φ. Воно інтенсифікує зниження характеристик її міцності, причому незалежно від орієнтації зразків та їх розташування по товщині стінки труб. Ефект зміцнення сталі внаслідок експлуатації максимально проявився біля зовнішньої поверхні труб, а знеміцнення – біля внутрішньої. На осьових зразках характеристики пластичності сталі після меншої кількості зупинок знизилися, а після більшої – відносно звуження зменшилося, а видовження зросло. Це пов'язали з розкриттям дефектів, утворених на етапі експлуатації сталі на парогоні. Особливо різке падіння характеристик пластичності за впливу наводнювання виявили на зразках радіальної орієнтації. Якщо без наводнювання сталі з блоку № 2 воно досягало 42%, то після наводнювання – 71%. Менш характерно це сталі з блоку № 1, для якої без наводнювання відносно звуження знизилося на 28%, а з наводнюванням – на 56%.

Мікрофрактографічний аналіз сталі у вихідному стані та після експлуатації без додаткового наводнювання виявив домінування в центральній частині зламів зразків в'язкого ямкового руйнування. Після наводнювання на зламах експлуатованої сталі додатково фіксували велику кількість лінзоподібних плитких ділянок, осередками зародження яких були відшаровані від матриці неметалеві включення, що пов'язали з деградацією сталі. Крім того, на зламах сталі, експлуатованої за більшої кількості зупинок, навіть у центральній їх частині виявили ділянки кризьзеренного відколу, тоді як без попереднього електролітичного наводнювання на зламі їх не було. Ці ділянки вважали фрактографічною ознакою окрихчувальної дії внутрішнього водню, сукупно абсорбованого сталлю і під час експлуатації на парогонах, і під час електролітичного наводнювання.

1. *Heloisia Cunha Furtado and Iain Le May* High temperature degradation in power plants and refineries // *Mat. Res.* – 2004. – **7**, № 1. – P. 103–110.
2. *Jakovljevic A.* Stress analysis of high pressure steamlines in thermal power plants // *Fracture of Nano and Eng. Mat. and Struct.: Proc. 16th Eur. Conf. of Fracture* (Alexandroupolis, Greece, July 3–7, 2006). – Dordrecht: Springer, 2006. – P. 1033–1034.
3. *Krechkov's'ka H. V., Student O. Z., and Nykyforchyn H. M.* Diagnostics of the engineering state of steam pipeline of thermal power plants by the hardness and crack resistance of steel // *Materials Science.* – 2019. – **54**, № 5. – P. 627–637.
4. *Microstructure and mechanical properties of the T23 steel after long-term ageing at elevated temperature* / A. Zieliński, G. Golański, M. Sroka, and P. Skupień // *Materials at High Temperatures.* – 2016. – **33**, № 2. – P. 154–163.
5. *Fujio Abe* Progress in creep-resistant steels for high efficiency coal-fired power plants // *J. Pressure Vessel Techn.* – 2016. – **138**, № 4. – Article number: 040804.
6. *The evolution of complex carbide precipitates in a low alloy Cr–Mo–V steel after long-term aging treatment* / Yi Liu, Miao, Baosu Guo, James Ding, and Zhang Shuichang // *Materials.* – 2019. – **12**, № 10. – 1724 p.
7. *DuPont J. N., Siefert J. A., and Shingledecker J. P.* Microstructural evolution and mechanical properties of Grades 23 and 24 creep strength enhanced ferritic steels // *Int. Mat. Rev.* – 2016. – **62**, № 1. – P. 1–25.
8. *Baltušnikas A., Levinskas R., and Lukoštūtė I.* Kinetics of carbide formation during ageing of pearlitic 12X1MΦ steel // *Mat. Sci. (Medžiagotyra).* – 2007. – **13**, № 4. – P. 286–292.
9. *Restoration of the properties of heat-resistant steel after long-term operation in a steam turbine* / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, L. M. Svirska, and P. R. Solovei // *Materials Science.* – 2021. – **57**, № 1. – P. 71–79.
10. *Influence of M23C6 carbides on the heterogeneous strain development in annealed 420 stainless steel* / J. Hidalgo, M. Vittoriotti, H. Farahani, F. Verduyck, R. Petrov, and J. Sietsma // *Acta Mat.* – 2020. – **200**. – P. 74–90.
11. *Creep fracture strength in hydrogen of Cr–Mo–V steel* / O. Z. Student, H. Matysiak, A. Zagórski, L. O. Babiy, K. J. and Kurzydłowski // *Inżyn. Powier.* – 2005. – **1**, № 2A. – P. 175–179.
12. *Peculiarities of hydrogen effect on the creep process in the Cr–Ni–Mo steel* / A. Zagórski, O. Student, L. Babij, H. Nykyforchyn, and K. J. Kurzydłowski // *Adv. in Mat. Sci.* – 2007. – **7**, 1(11). – P. 211–218.
13. *Krechkov's'ka 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**. – P. 701–711.
14. *Student O. Z., Markov A. D., and Nykyforchyn H. M.* Specific features of the influence of hydrogen on the properties and mechanism of fracture of the metal of welded joints of steam pipelines at thermal power plants // *Materials Science.* – 2006. – **42**, № 4. – P. 451–460.
15. *Predicting the state of heat-resistant steel of a steam pipeline at a TPP taking into account changes in its strength due to operational damage* / H. Krechkovska, V. Sylovanyuk, O. Student, and A. Chornenkyi // *Proc. Struct. Integrity.* – 2022. – **36**. – P. 43–50.
16. *Krechkov's'ka H. V.* Fractographic signs of the mechanisms of transportation of hydrogen in structural steels // *Materials Science.* – 2016. – **51**, № 4. – P. 509–513.
17. *Dzioba I., Gajewski M., and Neimitz A.* Studies of fracture processes in Cr–Mo–V ferritic steel with various types of microstructures // *Int. J. of Pressure Vessels and Piping.* – 2010. – **87**, № 10. – P. 575–586.
18. *Krechkovska H. V.* Structural-fractographic features of structural steels after long-term operation // *Materials Science.* – 2021. – **57**, № 2. – P. 228–233.
19. *Operated steel degradation peculiarities of the different elements of power steam pipelines* / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, H. M. Nykyforchyn, and O. I. Zvirko // *ICF 2017, 14th Int. Conf. on Fract.* – Rhodes, 2017. – **2**. – P. 249–250.
20. *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, and V. V. Shyrokov // *Materials Science.* – 2021. – **57**, № 3. – P. 404–412.
21. *Krechkovska G. V., and Student O. Z.* Change of mechanical characteristics of heat-resistant 15X1M1Φ steel after operation in the main steam conduits of thermal power stations // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2011. – **33**. – P. 437–447.
22. *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. Krechkov's'ka, T. E. Palashchuk, and Ya. M. Hladkyi // *Materials Science.* – 2018. – **53**, № 4. – P. 460–467.

Одержано 12.05.2022