

УДК 621.325:669.539.43

АНИЗОТРОПІЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕГРАДОВАНОЇ СТАЛІ 15X1M1Ф ПІСЛЯ ЇЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ПАРОГОНАХ ТЕС

О. З. СТУДЕНТ, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА

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

Досліджено механічні властивості теплотривкої сталі 15X1M1Ф після тривалої експлуатації на парогоних ТЕС. Встановлено анізотропію характеристик її міцності та пластичності внаслідок деградації. Виявлено, що кількість зупинок технологічного процесу під час експлуатації сталі, орієнтація зразків (осьова, тангенціальна та радіальна) та місце їх розташування в перерізі стінки труб (біля зовнішньої і внутрішньої їх поверхонь та в центрі перерізу) впливають на ці параметри. Оцінена роль наводнювання на характер зміни цих показників. Отримані результати дають змогу обґрунтувати вибір орієнтації зразків та їх розташування в перерізі труб для забезпечення найвищої чутливості характеристик до зміни технічного стану сталі в часі експлуатації.

Ключові слова: *теплотривка сталь, головні парогони, деградація, наводнювання, механічні характеристики за розтягу, анізотропія, орієнтація зразків.*

Метал головних парогонів ТЕС зазнає сумісного впливу низки технологічних чинників, що зумовлюють його деградацію. Останнім часом експлуатаційники, крім наводнювального середовища та жорстких температурно-силових умов експлуатації (температура пари в парогоних досягає 570°C, а тиск 24 МПа), виділяють ще одну причину втрати роботоздатності обладнання – часті зупинки технологічного процесу через експлуатацію блоків у маневровому режимі [1]. Нагрівання і охолодження труб під час зупинок блоків супроводжується виникненням додаткових термічних напружень у їх перерізі, які сумарно з напруженнями від внутрішнього тиску можуть подекуди досягати критичних значень [2, 3].

Відомо, що стандартні механічні характеристики за розтягу на повітрі слабо реагують на деградацію металу внаслідок тривалої експлуатації [4]. Натомість, їх чутливість до деградації за наводнювання металу, яке завжди реалізується під час функціонування таких об'єктів, як парогони [5], відчутно зростає [6]. Тому стан металу парогону доцільно оцінювати за додаткового наводнювання. Не зважаючи на те, що властивості металу експлуатованих парогонів активно досліджували впродовж останніх 50-ти років [7–9, 4, 10, 11], і надалі питання про придатність традиційних механічних характеристик для оцінювання роботоздатності експлуатованих сталей залишається відкритим. У документі [12], який регламентує допустимі значення механічних характеристик парогінних сталей, однозначно не вказано орієнтацію зразків та їх розташування в перерізі стінки труби. Не розкрито також можливості використання наводнювання металу для підвищення чутливості інтегральних механічних параметрів до зміни технічного стану металу внаслідок деградації.

Мета дослідження – вивчити зміну механічних характеристик за розтягу сталі 15X1M1Ф, експлуатованої на парогоні ТЕС, залежно від кількості зупинок блоків, орієнтації зразків, їх розташування по товщині перерізу труби і впливу наводнювання та обґрунтувати рекомендації для вибору орієнтації зразків та ролі наводнювання, щоб досягти максимальної чутливості цих характеристик до деградації.

Матеріали та методика випроб. Досліджували сталь 15X1M1Ф (0,14% С; 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 парогонках ТЕС. За однакової тривалості експлуатації метал з блоків № 1 і 2 відрізнявся за кількістю зупинок технологічного процесу (загальна кількість зупинок першого блоку $N_{\Sigma} = 501$, а вимушених – $N_{for} = 219$, а другого – $N_{\Sigma} = 576$, $N_{for} = 283$).

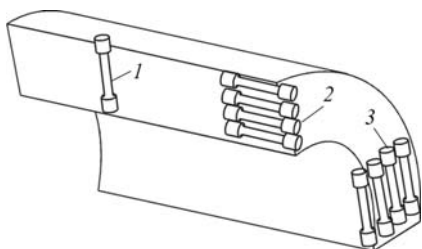


Рис. 1. Схема вирізання зразків для випроб розтягом, орієнтованих у радіальному (1), осьовому (2) та тангенціальному (3) напрямках.

Fig. 1. The scheme of cutting specimens for tensile tests oriented in the radial (1), axial (2), and tangential (3) directions.

Технічний стан деградованого металу оцінювали за стандартними механічними характеристиками міцності та пластичності під час розтягу гладких циліндричних зразків діаметром 5 mm і довжиною робочої частини 25 mm на машині УМЕ-10Т за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Робочу їх частину полірували і випробовували на повітрі без та після попереднього електролітичного наводнювання в електроліті (0,5 М водний розчин сірчаної кислоти з додаванням 2 g/l тіомочевини за густини струму наводнювання 50 mA/cm² та тривалості наводнювання 0,25 h). Так моделювали вплив внутрішнього водню, абсорбованого металом під час поперед-

нього наводнювання. Вплив орієнтації зразків до осі труби на чутливість механічних характеристик до деградації металу дослідили в трьох взаємно перпендикулярних напрямках: радіальному (R), тангенціальному (C) та осьовому (L) (рис. 1).

За довірчої імовірності 0,95 і до п'яти випроб на розтяг відносна похибка визначення характеристик міцності та пластичності не перевищувала 2...3%.

Оцінювання деградації сталі під час експлуатації. Незалежно від орієнтації зразків, вирізаних на різній віддалі t від зовнішньої поверхні труб, границя міцності σ_B експлуатованого металу дещо нижча (за винятком незначного зміцнення металу з блоку № 1 біля зовнішньої поверхні труби), ніж у вихідному стані (рис. 2a–c). Водночас по всій товщині стінки труб зафіксували неоднозначну зміну показника $\sigma_{0,2}$ залежно від деградації сталі через різну кількість зупинок блоків під час експлуатації парогонів (рис. 2d–f). Причому незалежно від орієнтації зразків величина $\sigma_{0,2}$ металу, експлуатованого на блоці № 1, по всій товщині стінки труб істотно вища, ніж у вихідному стані, що свідчить про зміцнення сталі внаслідок експлуатації. Незначний ефект її зміцнення за показником $\sigma_{0,2}$ зберігається і після експлуатації на блоці № 2, але лише поблизу зовнішньої поверхні труби. Тоді як у більшій половині перерізу, що прилягає до її внутрішньої поверхні, та в усьому перерізі за рівнем σ_B однозначно спостерігали лише знеміцнення сталі.

Слід підкреслити, що обидва показники міцності сталі у вихідному стані зростають у напрямі від зовнішньої до внутрішньої поверхонь труби, тоді як для експлуатованого металу вони або залишаються незмінними поперек стінки труби, або навіть дещо знижуються від зовнішньої до внутрішньої поверхонь (рис. 2a, b, d, e). Отже, можна стверджувати, що за показниками міцності, по-перше, експлуатований метал біля внутрішньої поверхні труб, яка безпосередньо контактує з технологічним середовищем, деградує інтенсивніше, ніж біля зовнішньої. По-друге, попри однакову тривалість експлуатації металу на обох блоках, за меншої кількості зупинок технологічного процесу на блоці № 1 виявлено ефект зміцнення металу, тоді як за більшої (на блоці № 2) його знеміцнення май-

же в усьому перерізі труб порівняно з вихідним станом. Це підтверджує вплив пусків-зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану сталі: метал з блоку № 2, який переніс більшу кількість зупинок, за міцністю є гірший, ніж з блоку № 1 після меншої їх кількості.

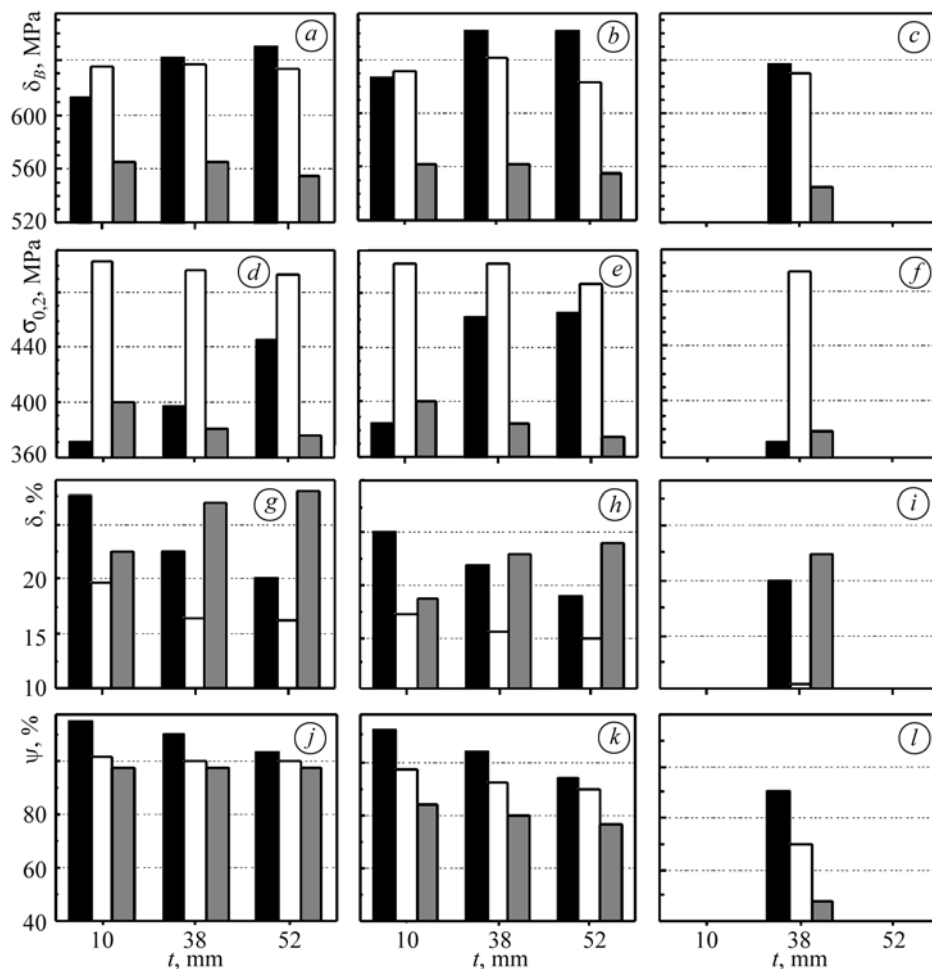


Рис. 2. Границі міцності σ_B (a–c) і текучості $\sigma_{0,2}$ (d–f) та відносні видовження δ (g–i) і звуження ψ (j–l) сталі 15X1M1Φ у вихідному стані (чорні стовпчики) та після експлуатації на блоках № 1 (білі) і № 2 (сірі), визначені на зразках осьовій (a, d, g, j), тангенціальної (b, e, h, k) та радіальної (c, f, i, l) орієнтацій, вирізаних на різній віддалі від зовнішньої поверхні труби t .

Fig. 2. Ultimate strength, σ_B , (a–c) and yield strength, $\sigma_{0,2}$, (d–f) and also elongation, δ , (g–i) and reduction of area, ψ , (j–l) of the 15X1M1Φ steel in virgin state (black) and after service on power blocks № 1 (white) and № 2 (grey bars) determined on the specimens oriented in axial (a, d, g, j), tangential (b, e, h, k) and radial (c, f, i, l) orientations cut out at different distance from the outside pipe surface t .

Відносне видовження δ для сталі у вихідному стані та експлуатованої на блоці № 1 дещо знижується від зовнішньої до внутрішньої поверхонь труби і на осьових (рис. 2g), і тангенціальних (рис. 2h) зразках. Водночас для металу з блоку № 2 виявили зростання цього показника в напрямі від зовнішньої до внутрішньої поверхонь. Ледь відчутна тенденція до зниження поперек стінки труби зберігається за показником ψ для металу у вихідному стані та експлуатованого на обох блоках (рис. 2j, k). Причому на тангенціально орієнтованих зразках вона виразніша.

Особливістю металу з блоку № 2 є те, що незалежно від орієнтації зразків його показники пластичності змінюються якісно протилежно. В значній частині перерізу труби, наближеній до її внутрішньої поверхні, відносно звуження експлуатованого металу знижується, а відносно видовження зростає порівняно з властивими металу у вихідному стані. Можливо, відсутність кореляції між значеннями δ та ψ пов'язана з дефектністю металу з цього блоку вздовж меж зерен фериту з ланцюжками карбідів на них, яке зафіксовано за результатами металографічних досліджень і фрактографії зразків з цього самого металу, випробуваних на циклічну тріщиностійкість [13].

Прояви деградації сталі залежно від орієнтації зразків. Анізотропію механічних властивостей з'ясували, аналізуючи дані, отримані на зразках трьох орієнтацій (див. рис. 1). Про неї судили, зіставляючи відносну зміну характеристик сталі, експлуатованої на обох блоках, з їх значеннями у вихідному стані (рис. 3). Виявили, що, по-перше, на всіх рівнях по товщині стінки труб характеристики міцності є найнижчі для тангенціально орієнтованих зразків. По-друге, ефект зміцнення металу обох блоків наростає від зовнішньої до внутрішньої поверхонь труб і максимальний біля внутрішніх, які під час експлуатації контактували з технологічним середовищем. Зокрема, після більшої кількості зупинок технологічного процесу (блок № 2) максимальне зниження границі міцності металу досягає 17% від властивого сталі у вихідному стані, тоді як за меншої (блок № 1) – лише на 7% (рис. 3а).

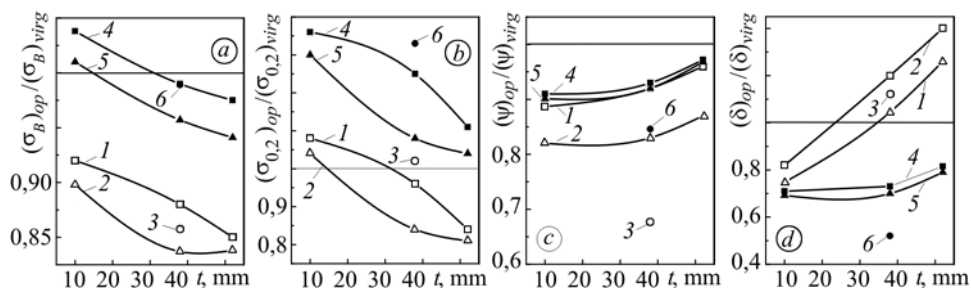


Рис. 3. Відносна зміна границь міцності σ_B (а) і текучості $\sigma_{0,2}$ (б), а також відносних звуження ψ (с) та видовження δ (д) сталі 15X1M1Φ, експлуатованої (з індексом *op*) на блоках № 2 криві (1–3) та № 1 криві (4–6) порівняно з відповідними її характеристиками у вихідному стані (з індексом *virg*), визначеними на повітрі на зразках осьової (1, 4), тангенціальної (2, 5) та радіальної (3, 6) орієнтації, розташованих на віддалі *t* від зовнішньої поверхні труби.

Fig. 3. Relative change of the ultimate strength, σ_B , (a) and yield strength, $\sigma_{0,2}$, (b), reduction of area, ψ , (c) and elongation, δ , (d) and of the 15X1M1Φ steel serviced (with index *op*) on power blocks № 2 curves (1–3) and № 1 curves (4–6) relative to corresponding characteristics of steel in virgin state (with index *virg*) determined in air at different state distance, *t*, from the pipe outer surface and oriented in axial (1, 4), tangential (2, 5) and radial (3, 6) directions.

За показником $\sigma_{0,2}$ ефект зміцнення металу з блоку № 1 змінюється на зміцнення металу з блоку № 2 майже у всьому перерізі труби (рис. 3б). Оскільки границя міцності експлуатованої сталі слабо залежить від орієнтації зразків (зокрема, в серцевині стінки труби для сталі, експлуатованої на блоці № 2, її зниження досягло 14% на радіально орієнтованих зразках, 12% – на осьових і 16% – на тангенціальних), то можна зробити висновок, що для економії об'ємів вирізання металу з парогонів для тестування доцільно використати радіально і тангенціально орієнтовані зразки, оскільки зміна міцності металу в серцевині стінки труб на зразках різної орієнтації слабо залежить від їх орієнтації. За наведеними залежностями змі-

ни характеристик міцності поперек стінки труби можна прогнозувати їх значення в околі зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби для атестованої сталі.

Одним із чутливих показників деградації теплопривних сталей внаслідок їх тривалої експлуатації на головних парогонях ТЕС вважають характеристики пластичності, зокрема, відносне звуження ψ [4]. Після експлуатації цей параметр на обох блоках однозначно знижується порівняно з вихідним станом металу (рис. 3с). Така тенденція виявляється незалежно від орієнтації зразків. Найнижчі значення ψ для металу з обох блоків отримали на радіально орієнтованих зразках. Ефект досягає 33% за більшої кількості зупинок технологічного процесу і 15% – за меншої. Можливо, це спричинено тим, що радіально орієнтовані зразки руйнуються шляхом розшарування вздовж текстури, а не шляхом її перетинання, як тангенціальні та осьові зразки. Водночас незалежно від орієнтації зразків (осьова чи тангенціальна) втрата пластичності за показником ψ максимальна біля зовнішньої поверхні труб (рис. 3с), що є ознакою сильнішої тут деградації сталі і пов'язано, очевидно, зі сприятливішими умовами для повзучості. Перепад по товщині стінки труби для металу з блоку № 1 становив від 8 до 3%, причому практично незалежно від орієнтації зразків. Тоді як для металу з блоку № 2 зниження ψ внаслідок деградації за осьовою орієнтації становило від 11% в околі зовнішньої поверхні труби до 4% біля внутрішньої, а для тангенціальної орієнтації – від 18 до 13% відповідно. Отже, з аналізу зміни параметра ψ прийшли до подібних висновків, сформульованих з оцінки показників міцності. Зокрема, аналізуючи деградацію теплопривних сталей за показником ψ , перевагу слід віддавати тангенціальній орієнтації зразків, а якщо товщина стінки труби дозволяє зробити це, то ще краще використати їх радіальну орієнтацію.

До зовсім неочікуваних висновків дійшли з аналізу результатів про відносне видовження δ . По-перше, незалежно від орієнтації зразків спостерігали нетипове його зростання для сталі, експлуатованої на блоці № 2, порівняно з зафіксованим для сталей у вихідному стані (рис. 3d), що не узгоджується з визнаними уявленнями про тенденцію зміни обох характеристик пластичності. Адже за будь-якого іншого (крім деградації) впливу на метал (термічне оброблення, легування тощо) ці показники зазвичай змінюються якісно подібно – або одночасно зростають, або ж знижуються. Крім того, під час оцінки відносного звуження метал з обох блоків виявив прогнозовану тенденцію: значення ψ сталі з блоку № 2 було нижчим, ніж з блоку № 1. Логічно очікувати подібний характер зміни і показника δ . Раніше вже йшлося про атипову зміну показників пластичності деградованого металу шва зі зварного з'єднання на парогонях ТЕС [14] трубних сталей, експлуатованих на газогонях [15], алюмінієвих сплавів у літакобудуванні [16]. В усіх випадках цей ефект пов'язували з дефектами, які на етапі активного навантаження зразків розкриваються і, попри зниження показника ψ , спричиняють аномальне підвищення δ . Обидві характеристики пластичності металу, експлуатованого на блоці № 1, змінюються за класичним правилом – якісно подібно. Отже, кількість дефектів у ньому недостатня, щоб змінити типову тенденцію зміни цих характеристик. Але коли тенденції їх зміни стають протилежними (метал з блоку № 2), то за значенням поширеного в теплоенергетиці показника роботоздатності δ можна зробити помилковий висновок про задовільний технічний стан металу, який насправді потрібно знімати з експлуатації.

Вплив попереднього електролітичного наводнювання на механічні характеристики сталі. Оскільки наводнювання може сприяти розкриттю у сталі дефектів, які виникли ще на етапі її експлуатації на парогонях, дослідили серію зразків після попереднього (перед розтягом на повітрі) електролітичного наводнювання. При цьому оцінювали вплив внутрішнього водню, який потрапив до металу пе-

ред його навантаженням, і порівнювали характеристики міцності і пластичності на зразках різної орієнтації та на різних рівнях по товщині стінки труб. Для цього проаналізували відносну зміну відповідних показників попередньо наводненої та ненаводненої сталі з обох блоків, а також у вихідному стані.

Аналіз характеристик міцності осьових і тангенціальних зразків лише підтвердив висновки, зроблені з результатів випроб на повітрі зразків без попереднього електролітичного наводнювання. Зокрема, внаслідок деградації обидві характеристики міцності знижуються від зовнішньої до внутрішньої поверхонь труби (рис. 4а, б). Причому, якщо порівняти дані, отримані без (рис. 3) та після (рис. 4) попереднього наводнювання, то незалежно від орієнтації зразків наводнювання істотно інтенсифікує їх падіння.

Тенденції ж зміни характеристик пластичності, спричинені деградацією, стають ще очевиднішими в наводненому металі (рис. 4с, д). Попереднє наводнювання додатково знижує відносне звуження деградованого металу, причому незалежно від орієнтації зразків та від їх розташування в перерізі труб (рис. 4с). Особливо різке це проявляється на зразках радіальної орієнтації. Якщо без наводнювання сталі з блоку № 2 воно становило 32%, то після наводнювання досягло 71%. Те ж відбулося і для сталі з блоку № 1, в якій значення ψ під впливом наводнювання знизилася на 56%, порівняно з 15% без нього.

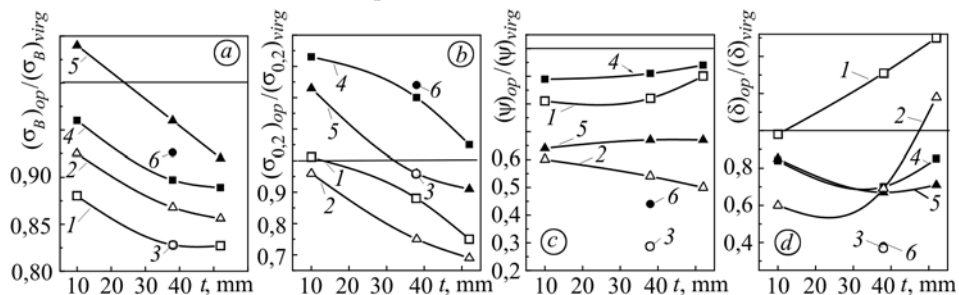


Рис. 4. Відносна зміна границь міцності σ_B (а) і текучості $\sigma_{0,2}$ (б), а також відносного звуження ψ (с) і видовження δ (д), визначених на повітрі на зразках осьової (1, 4), тангенціальної (2, 5) та радіальної (3, 6) орієнтації, розташованих на віддалі t від зовнішньої поверхні труби, для попередньо наводненої сталі 15X1M1Ф, експлуатованої (з індексом *op*) на блоках № 2 (1–3) та № 1 (4–6), порівняно з відповідними характеристиками попередньо наводненої сталі у вихідному стані (з індексом *virg*).

Fig. 4. Relative change of the ultimate strength, σ_B , (a) and yield strength, $\sigma_{0,2}$, (b), reduction of area, ψ , (c) and elongation, δ , (d) determined in air on the specimens oriented in axial (1, 4), tangential (2, 5) and radial (2, 6) located at the distance, t , from the external pipe surface for the preliminary hydrogenated 15X1M1Ф steel serviced (with index *op*) on power blocks № 2 (1–3) and № 1 (4–6) relative to corresponding characteristics of preliminary hydrogenated steel in virgin state (with index *virg*).

Після попереднього наводнювання зразків з блоку № 1 величина δ додатково знижується порівняно з випробами без нього. Крім того, негативний вплив деградації під впливом наводнювання дещо слабшає в околі зовнішньої поверхні труби та посилюється поблизу її внутрішньої поверхні і практично не залежить від орієнтації зразків (рис. 4д).

Величина δ для сталі з блоку № 2 після наводнювання зразків осьової орієнтації зростає практично в усьому перерізі труби (рис. 4д), що може бути ознакою полегшення під впливом водню розкриття дефектів, що виникли під час експлуатації сталі з великою кількістю зупинок технологічного процесу. При цьому позитивний вплив на значення δ зразків тангенціальної орієнтації після їх наводнювання зафіксовано лише біля внутрішньої поверхні труб. Внутрішній водень менше впливає на параметр δ сталі з блоку № 2, визначений на тангенціальних зраз-

ках, майже в усьому перерізі труб. За радіальної їх орієнтації після наводнювання значення δ знижується більше ніж на 63%, тоді як без наводнювання спостерігали хоч і незначне (на 10%), але підвищення його внаслідок деградації. Отже, полегшення розкриття дефектів в експлуатованому металі під впливом внутрішнього водню залежить не лише від технічного стану металу (проявляється на металі з блоку № 2), але і від орієнтації зразків. Це настановує на думку про існування дефектів у стінці труб, розташованих переважно в діаметральному їх перерізі. Причиною виникнення цих пошкод може бути термічна втома, спричинена зупинками технологічного процесу. Адже дефекти повзучості переважно розташовані в осьовому перерізі і повинні б додатково розкриватися і підвищувати параметр δ , визначений на тангенціальних зразках. Разом з тим, оскільки цей ефект можна знехтувати, то основний вклад у зростання δ вносять саме дефекти від термічної втоми.

ВИСНОВКИ

Кількість зупинок технологічного процесу впливає на зміну характеристик міцності і пластичності сталі 15X1MФ внаслідок її експлуатації. Якщо судити за параметром $\sigma_{0,2}$, то незалежно від орієнтації зразків і місця їх розташування в перерізі труб за меншої кількості зупинок технологічного процесу під час експлуатації весь переріз труби зміцнюється, а за більшої – знеміцнюється проти металу у вихідному стані. За обома показниками міцності ефект зміцнення сталі внаслідок експлуатації максимально проявляється на зовнішній поверхні труб, а знеміцнення – на внутрішній. Характеристики пластичності сталі після меншої кількості зупинок технологічного процесу знижуються, а після більшої – відносно звууження зменшується, а видовження в околі внутрішньої поверхні труб зростає. Це пов'язано з розкриттям дефектів, що виникли ще на етапі експлуатації сталі на парогоні. Попереднє електролітичне наводнювання металу чіткіше виявляє ці особливості.

РЕЗЮМЕ. Исследованы механические свойства теплоустойкой стали 15X1M1Ф после длительной эксплуатации на паропроводах ТЭС. Установлена анизотропия характеристик прочности и пластичности стали, обусловленная ее деградацией. Показано, что количество остановок технологического процесса во время эксплуатации стали, ориентация образцов (осевая, тангенциальная и радиальная) и место их размещения относительно стенки труб (в окрестности внешней и внутренней поверхностей труб или в центре их сечения) влияют на эти характеристики. Выявлено влияние наводороживания на характер изменения этих показателей. Полученные результаты дают возможность обосновать выбор ориентации образцов и их расположения в сечении труб для обеспечения максимальной чувствительности характеристик к изменению технического состояния стали во время эксплуатации.

SUMMARY. Mechanical properties of the 15X1M1Ф heat resistant steel after its long term operation on the steam pipeline of heat power plant were investigated. Anisotropy of strength and plasticity characteristics of steel caused by its degradation was revealed. It was shown that the shut-down numbers of operating procedure during steel service, specimen orientations (axial, tangential and radial) and site of its location relative to pipe wall (near outer and inner surfaces of pipes or in the centre of their cross section) have an influence on these characteristics. The hydrogenation effect on the change of these characteristics was shown. Obtained results enable us to prove the selection of specimen orientation and its location in the pipe cross section in order to ensure the maximum sensitivity of characteristics to the change of steel technical state in operation.

1. *СОУ 40.3–0013044–20:2010.* Нормативний документ. Настанова. Оцінювання технічного стану металу прямих ділянок головних парогонів ТЕС. Вплив зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану експлуатованого металу. Типова інструкція. – Львів: ДП “ЛКБ” і ФМІ НАНУ, 2010. – 52 с.
2. *Вігак В. М.* Оптимальне управління нестационарними температурними режимами. – К.: Наук. думка, 1979. – 360 с.
3. *Panasyuk V. V.* Strength and Fracture of Solids with Cracks. – Lviv: NASU, Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2002. – 468 p.

4. *Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафто-та паропроводів* / В. В. Панасюк, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, З. В. Слободян // *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій* / За заг. ред. О. Є. Андрейківа, Й. Й. Лучка, В. В. Божидарника. – Львів: Каменяр, 2002. – С. 537–546.
5. *Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смиян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К.: Наук. думка, 1990. – 272 с.
6. *Студент О. З., Марков А. Д., Никифорчин Г. М.* Особливості впливу водню на властивості і механізм руйнування металу зварних з'єднань парогонів ТЕС // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2006. – № 4. – С. 26–35.
(*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.)
7. *Свойства металла паропроводов из сталей 12ХМ и 15ХМ после эксплуатации в течение 90–160 тыс. ч.* / П. А. Антикайн, Б. М. Эстрин, П. Р. Должанский, Л. И. Рябова // *Теплоэнергетика.* – 1973. – № 8. – С. 23–27.
8. *Антикайн П. А., Рябова Л. И., Аксенов А. В.* К оценке работоспособности паропроводов из перлитных сталей после длительной эксплуатации // *Проблемы прочности.* – 1971. – № 7. – С. 9–14.
9. *Ріней І. В., Онищак Я. Д.* Оцінка роботоздатності парогонів зі сталі 12Х1МФ під час тривалої експлуатації // *Вісник Інженерної академії України.* – 2008. – № 3–4. – С. 192–195.
10. *Effect of ageing of steam pipeline steel on its fatigue crack growth resistance* / G. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, B. P. Loniuk, I. R. Dzioba // *8th Int. Conf. Mechanical Behavior of Materials: Progress in Mechanical Behavior of Materials – ICM8, Victoria, 1999* / Ed. F. Ellyin, J. W. Provan. – Victoria: Fleming Printing Ltd., 1999. – Vol. 1. – P. 398–403.
11. *Дзіоба І. Р.* Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – № 3. – С. 67–72.
(*Dzioba I. R.* Properties of 13KhMF steel after operation and degradation under the laboratory conditions // *Materials Science.* – 2010. – **46**, № 3. – P. 357–364.)
12. *СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2004.* Нормативний документ. Настанова. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція. – К.: ОЕП “ГРІФРЕ”, 2005. – 76 с.
13. *Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС* / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, А. Д. Марков // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – № 2. – С. 42–54.
(*Evaluation of the influence of shutdowns of a technological process on changes in the in-service state of the metal of main steam pipelines of thermal power plants* / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, and A. D. Markov // *Materials Science.* – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)
14. *Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д.* Аномальний прояв високотемпературної деградації металу зварного з'єднання оцаднолегованої сталі // *Там же.* – 2007. – № 1. – С. 73–79.
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., and Markov A. D.* Abnormal manifestation of the high-temperature degradation of the weld metal of a low alloy steel welded joint *Materials Science.* – 2007. – **43**, № 1. – P. 77–84.)
15. *Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу* / О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь, О. І. Звірко // *Там же.* – 2010. – № 5. – С. 55–59.
(*Degradation of properties of the metal of welded joints in operating gas mains* / O. T. Tsyurul'nyk, V. A. Voloshyn, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil', and O. I. Zvirko // *Materials Science.* – 2011. – **46**, № 5. – P. 573–582.)
16. *Осташ О. П., Андрейко І. М., Головатюк Ю. В.* Деградація матеріалів і втомна довговічність тривало експлуатованих авіаконструкцій // *Там же.* – 2006. – № 4. – С. 5–17.
(*Ostash O. P., Andreiko I. M., and Holovatyuk Yu. V.* Degradation of materials and fatigue durability of aircraft constructions after long-term operation // *Materials Science* – 2006. – **42**, № 4. – P. 427–429.)

Одержано 24.10.2011