

УДК 620.17

**ВПЛИВ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТАЛІ 12Х1МФ ГИНІВ ГОЛОВНИХ ПАРОГОНІВ ТЕС НА ЇЇ МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**О. З. СТУДЕНТ<sup>1</sup>, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА<sup>1</sup>, Т. Є. ПАЛАЩУК<sup>1</sup>, Я. М. ГЛАДКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;<sup>2</sup> Хмельницький національний університет

Досліджено сталь 12Х1МФ з двох гинів головних парогонів ТЕС. Встановлено, що їх пошкодження відбувалося за механізмом міжзеренного руйнування внаслідок по-взучості. В одному з них, незважаючи на відповідність металу усіх зон гину вимогам до хімічного складу, твердості та характеристик міцності за розтягу, в розтягненій зоні виявлено наскрізні осьові тріщини. Водночас, попри нижчу за регламентовану міцність металу практично всіх зон іншого гину, у його розтягненій зоні зафіксували лише неглибоку (до 8 mm) осьову тріщину. Проте ударна в'язкість металу розтягнутої зони обох гинів нижча за регламентоване значення (одного гину – майже втричі, а іншого – вдвічі). Наднизький для такого класу сталей опір крихкому руйнуванню вважали за ознаку досягнення металом обох гинів критичного технічного стану.

**Ключові слова:** гини парогонів ТЕС, тривала експлуатація, деградація, механічні характеристики, фрактографічні особливості.

На сьогодні напрацювання значної частини устаткування енергоблоків ТЕС в Україні перевищило парковий ресурс, або близьке до нього. Зокрема, 92,1% енергоблоків ТЕС відпрацювали свій розрахунковий ресурс ( $10^5$  h), а 63,8% пере-тнули визнану у світовій практиці експлуатації межу граничного ресурсу та межу фізичного зносу (відповідно  $17 \cdot 10^4$  та  $2 \cdot 10^5$  h) і потребують модернізації чи заміни. Зокрема, в осінньо-зимовий період 2005–2006 рр. працювало 62 енергоблоки, 14 – у режимі резерву, а 21 визнано нероботоздатними [1]. Низька ефективність зношеного устаткування спричиняє перевитрати палива і погіршення економічних показників по галузі. Тому для України актуально оцінити і обґрунтувати можли-вість продовження ресурсу елементів конструкцій ТЕС, що відпрацювали парко-вий термін з гарантуванням їх безпечної експлуатації впродовж  $(35 \dots 40) \cdot 10^4$  h [2]. І першим кроком на цьому шляху є обґрунтування граничного стану тепло-тривких сталей після тривалої експлуатації на парогоних ТЕС, за перевищення якого суттєво зростає імовірність руйнування. Тому інформація про механічні характеристики сталі із пошкоджених елементів парогонів, які досягли критичної деградації, є необхідною передумовою для цього.

Конструкційно головні парогони монтують з прямих ділянок і гинів, що з'єднані між собою зварними з'єднаннями. Не дивлячись на те, що експлуатацій-ні параметри (температура і тиск пари) приблизно однакові вздовж всього парогону, їх вплив на різних ділянках дещо відрізняється. Аналіз причин низки аварій вказує на те, що парогони ТЕС зазвичай руйнуються у місцях інтенсифікації дії експлуатаційних чинників [3–5]. Вплив локальної концентрації напружень най-яскравіше проявляється на ділянках гинів труб. Оскільки діаметральний їх пере-різ має форму деформованого еліпса, то під дією внутрішнього тиску створюють-ся зони концентрації напружень, розташовані на внутрішній поверхні труби по-близу нейтральної зони гину (НЗГ) і на зовнішній її поверхні на ділянці розтягне-

Контактна особа: О. З. СТУДЕНТ, e-mail: student@ipm.lviv.ua

ної його зони (РЗГ) [3]. Концентрація напружень сприяє зародженню у цих зонах тріщин. Тріщини повзучості, як правило, виникають у РЗГ [5]. В околі НЗГ вони спричинені термічною втомою за значної кількості пусків-зупинок технологічного процесу [4]. Адже під час високотемпературної експлуатації гини парогонів ТЕС періодично зазнають впливу високих термічних напружень, зумовлених градієнтом температури по товщині стінки труб і по їх довжині. Ці напруження змінюються під час експлуатації парогонів (особливо суттєво – за пусків і зупинок енергоблоків) [6, 7].

Оскільки вплив експлуатаційної деградації на механічні характеристики прямих ділянок парогонів і їх зварних з'єднань вже вивчений [8–10], тому нижче оцінили технічний стан критично деградованої сталі 12Х1МФ гинів головних парогонів ТЕС за її механічними характеристиками та встановили механізм їх пошкодження під час експлуатації.

**Матеріали та методики.** Дослідили сталь 12Х1МФ з двох гинів головних парогонів ТЕС, які виготовлені з труби  $\varnothing$  325 mm і товщиною стінки 38 mm та експлуатувалися  $\sim 286 \cdot 10^3$  h за температури  $\sim 545^\circ\text{C}$  і тиску пари  $\sim 14$  МПа. Залишкова деформація гину № 1 досягла 0,28, а № 2 – 0,18 %, що не виходило за регламентовані межі. В розтягнених зонах обох гинів виникли осьові тріщини (наскрізні – на гині № 1, якими теплоносій витікав назовні, і поверхневі – на гині № 2).

Хімічний склад сталі обох гинів визначали на оптичному іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5 (див. таблицю). Порівнюючи склад сталі із регламентованим, виявили, що за вмістом практично всіх елементів вимоги дотримані, а незначні відхилення за кількістю S і P (гин № 1) та Cu (в обох гинах) не могли визначально впливати.

**Хімічний склад сталі 12Х1МФ з двох гинів головних парогонів ТЕС, mass%**

| Гин                       | C               | Si              | Mn              | Cr              | S       | P       | Cu    | Ni     | V               | Mo              |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|---------|-------|--------|-----------------|-----------------|
| № 1, РЗГ                  | 0,12            | 0,27            | 0,49            | 0,93            | 0,03    | 0,03    | 0,23  | 0,19   | 0,21            | 0,30            |
| № 2, РЗГ                  | 0,10            | 0,22            | 0,50            | 0,84            | 0,01    | 0,0005  | 0,21  | 0,19   | 0,23            | 0,28            |
| Згідно з ТУ 14-3-460:2009 | 0,10...<br>0,15 | 0,17...<br>0,37 | 0,40...<br>0,70 | 0,90...<br>1,20 | < 0,025 | < 0,025 | < 0,2 | < 0,25 | 0,15...<br>0,30 | 0,25...<br>0,35 |

Механічні характеристики металу різних зон гинів (РЗГ, стиснена (СЗГ) та НЗГ) оцінили на трьох рівнях по товщині стінки труби (біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь та в центральній частині її перерізу). Тангенціальні зразки з РЗГ № 1 вирізали безпосередньо під поверхнею експлуатаційного зламу (при цьому вони руйнувалися на віддалі до 35 mm від нього), а з гину № 2 – на віддалі 100 mm від вершини виявленої на гині осьової тріщини. Робочі частини зразків у СЗГ і НЗГ розташовували симетрично відносно центра цих зон.

Характеристики міцності (границі міцності  $\sigma_B$  та плинності  $\sigma_{0,2}$ ) і пластичності (відносні видовження  $\delta$  та звуження  $\psi$ ) сталі визначали на гладких тангенціально орієнтованих до осі труб циліндричних зразках  $\varnothing$  5 mm. Зразки випробовували на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформування  $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Ударну в'язкість оцінили на зразках Шарпі (з V-подібним надрізом радіусом 0,2 mm) та Менаже (з U-подібним концентратором). Всі зразки випробовували на маятниковому копрі типу ІО-5003. Для фрактографічних досліджень використали сканівний електронний мікроскоп EVO 40XVP. Щоб отримати поверхню експлуатаційного зламу гину № 2, поверхневу осьову тріщину в його розтягненій зоні механічно розкрили.

**Результати досліджень. Механізм руйнування гинів парогонів.** Щільна оксидна плівка, сформована під час високотемпературної експлуатації гинів, покривала аналізовані поверхні їх зламів і перешкоджала фрактографічним дослідженням. Адже під час зупинок блоків створювалися сприятливі умови для автокаталітичного нарощування оксидів у зоні контактування берегів тріщин внаслідок дії стискальних напружень. Крім того, потік високотемпературної пари, який вирвався зсередини труби назовні, додатково згладив злам гину № 1. Тому злами багаторазово чистили. Але навіть після цього рельєф зламу гину № 1 з мінімальними ушкодженнями виявляли лише в глибоких западинах або за виступами, які захищали поверхню зламу від потоку пари.

Як свідчать мікрофрактографічні дослідження, експлуатаційне руйнування обох гинів починалося від зовнішньої поверхні труби в РЗГ шляхом міжзеренного росту тріщин, характерного для руйнування через повзучість. На цьому етапі на зламах збереглися лише залишки рельєфу міжзеренного руйнування у вигляді вторинного розтріскування вздовж меж зерен, що проникло вглиб металу. При цьому зона процесу охоплювала поодинокі зерна і, як наслідок, вторинне розтріскування на зламах контрастно окреслювало їх межі. У зоні докритичного руйнування, коли воно поширилося вглибину, напруження та деформації в залишковому перерізі стінки труби зросли і, як наслідок, швидкість поширення тріщини повзучості теж підвищилася. Вторинні тріщини, береги яких інтенсивно окиснені внаслідок тривалого впливу високої температури, контрастно декорували межі міжзеренних фрагментів, що свідчить про їх формування під час експлуатації. При цьому вторинні тріщини окантовували вже не окремі зерна, а їх конгломерати, що створювало видимість (якщо взяти до уваги вторинні тріщини на злам) зростання розміру зерна. На цьому етапі поширення тріщин в глибину стінки труб руйнування ставало рельєфнішим, міжзеренний механізм – очевиднішим, а вторинне розтріскування контрастно відтіняло практично всі межі зерен (рис. 1). Це ознака їх значного пошкодження порами, злиття яких могло спричинити таке суцільне розтріскування металу РЗГ.

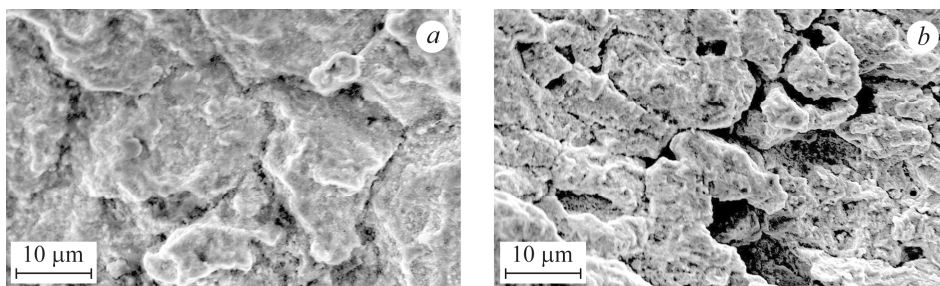


Рис. 1. Фрактограми поверхонь руйнування, утворених під час експлуатації гину № 1 (а) та отриманої шляхом розкриття тріщини на гині № 2 (б).

Fig. 1. Fractograms of the fracture surfaces formed during operation of bend № 1 (a) and obtained by crack opening on bend № 2 (b).

Зазвичай внаслідок високотемпературної деградації формується термодинамічно обумовлена рівноважна для ошадливолегованих теплопривних сталей ферит-карбідна структура. Найбільші за розмірами карбіди утворюються на нормально орієнтованих до напрямку дії тангенціальних (колових) напружень фрагментах меж феритних зерен. Їх максимальну кількість виявили в РЗГ саме в околі зовнішньої поверхні труб. Що більші за розмірами карбіди зароджувалися вздовж меж зерен внаслідок структурних перетворень, то вищі напруження виникали на межі їх поділу з феритною матрицею (через невідповідність коефіцієнтів їх термічного розширення). Як наслідок, швидше відбувалася декогезія вздовж

міжфазних меж фериту і карбідів з формуванням на межах зерен пор, сумірних з розмірами карбідів. Наводнювання металу інтенсифікує і таку декогезію [7], і повзучість металу [11]. За таким механізмом протікало пороутворення в металі обох гинів в околі зовнішньої поверхні труби, а термічна нестабільність роботи парогонів та наводнювання металу лише пришвидшували цей процес і створювали сприятливі передумови для пошкодження обох гинів. У ферит-перлітних сталях подібна декогезія (але видовжених вальцюванням неметалевих включень від матриці) спричинила макророзшарування всередині стінки труб магістральних газогонів [12]. Виникнення цих пошкоджень також пов'язали з особливостями мікроструктури і з дією абсорбованого металом водню.

**Твердість HB** сталі заміряли у різних зонах гинів поперек стінки труб (в діаметральному перерізі). В усіх зонах гину № 1 біля зовнішньої поверхні труби твердість 140...142 HB, а біля внутрішньої 138...140 HB. Середні ж її значення (за результатами 50 замірів в околі зовнішньої поверхні труби) становили: в РЗГ – 143, в НЗГ – 133, а в СЗГ – 139 HB, тоді як для металу гину № 2 вони були нижчі (в РЗГ – 123, в НЗГ – 126, а в СЗГ – 133 HB). Отже, в околі зовнішньої поверхні труби на гині № 1 максимальна твердість металу була в розтягненій зоні, тоді як на гині № 2 – у стисненій.

**Механічні характеристики за розтягу зразків.** Виявили, що незалежно від місця розташування зразків у перерізі труби значення границь міцності  $\sigma_B$  та плинності  $\sigma_{0,2}$  експлуатованої сталі гину № 2 дещо нижчі, ніж гину № 1 (рис. 2а, б), що узгоджується з дещо нижчою твердістю сталі гину № 2. Крім того, тут виявили відчутний градієнт значень характеристик міцності (причому і по периметру труби в діаметральному перерізі гину, і по товщині її стінки). І це попри практичну незмінність цих характеристик на гині № 1. Найнижчими виявилися характеристики плинності металу НЗГ № 2.

Згідно з нормативними вимогами  $\sigma_B = 441...637$ , а  $\sigma_{0,2} \geq 274$  МПа [13]. За цими характеристиками метал гину № 1 задовольнив їх (за винятком незначного відхилення від вимог до значень  $\sigma_{0,2}$  зразків з НЗГ, і то лише для металу в околі зовнішньої поверхні труби). Однак значення  $\sigma_B$  металу усіх зон гину № 2 (за винятком НЗГ біля зовнішньої поверхні труби), причому по всій товщині стінки труби, нижчі за регламентовані. Значення ж границі плинності  $\sigma_{0,2}$  лише для металу РЗГ (на всіх рівнях по товщині стінки труби) і СЗГ (і то лише біля зовнішньої поверхні труби) задовольнили вимоги [13]. Але наскрізні пошкодження виявили в розтягненій зоні гину № 1, характеристики міцності якої вищі, ніж для гину № 2.

Співвідношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ , прийняте в енергетиці як показник здатності металу до деформування, для металу розтягнутої зони обох гинів становило 0,69, що вважають ознакою високого запасу його пластичності. Не дивлячись на це, саме в цій зоні відбулося пошкодження гинів. Очевидно, структура металу гину № 1 змінювалася локально в околі лінії, що огинала поверхню гину труби в РЗГ (тоді як зразки вирізали з металу, розташованого нижче цієї лінії). Але з гину № 2 зразки вирізали попереду тріщини повзучості. Отже, оцінювання стану металу за цим критерієм не зовсім коректне для гинів парогонів.

За характеристиками пластичності метал гину № 1 в усіх зонах і по всій товщині стінки труби задовольнив вимоги регламенту (на рис. 2с, d, зліва). Отже, якщо визначати технічний стан металу цього гину за стандартними характеристиками міцності і пластичності, то ніяких підстав для його демонтажу взагалі не було. Водночас характеристики пластичності металу РЗГ № 2 стали нижчими за регламентовані (на рис. 2с, d, справа). Отже, за міцністю і пластичністю метал цього гину в розтягненій зоні виявився найгіршим. На цій підставі дійшли висновку, що метал гинів найінтенсивніше деградує в зоні з мінімальною товщиною стінки

труби (в РЗГ) і, щоб оцінити реальний стан експлуатованого металу, слід розташовувати робочу частину зразків на розтяг максимально близько до неї. Тому важливо встановлювати кореляційні залежності механічних характеристик і чутливих до деградації параметрів, визначених методами неруйнівного контролю [14].

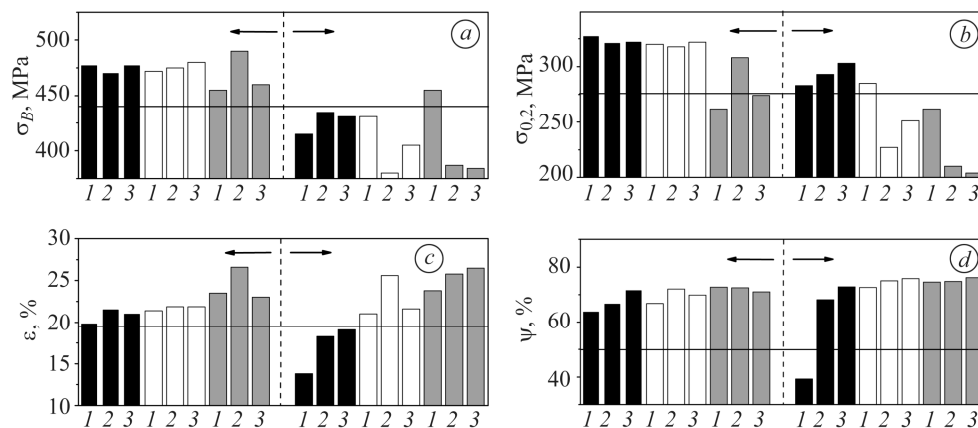


Рис. 2. Характеристики міцності  $\sigma_B$  (a),  $\sigma_{0.2}$  (b) і пластичності  $\delta$  (c) і  $\psi$  (d) сталі 12X1MФ після  $\sim 286 \cdot 10^3$  h експлуатації на гинах № 1 (зліва) та № 2 (справа) головних парогонів ТЕС, визначені в РЗГ (чорні стовпчики), СЗГ (білі) і НЗГ (сірі) біля зовнішньої (1) і внутрішньої (3) поверхонь труби та в центрі по товщині її стінки (2). Горизонтальні лінії відповідають мінімально допустимим значенням цих характеристик згідно з вимогами [13].

Fig. 2. Characteristics of strength  $\sigma_B$  (a),  $\sigma_{0.2}$  (b) and plasticity: elongation  $\delta$  (c) and area decrease  $\psi$  (d) of the 12X1MΦ specimens after  $\sim 286 \cdot 10^3$  h of operation on the bends of the main steam pipelines of TPPs (№ 1 in the left part of figures and № 2 in the right one) determined for tension (black columns), compressed (white) and neutral (grey) bending zones at the external (1) and the inner (3) pipe surfaces and in the central part of their wall thickness (2). Horizontal lines correspond to the minimum allowable values of these characteristics in accordance with the requirements [13].

**Ударна в'язкість.** За результатами випроб на удар металу гину № 1 отримали, що біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби значення  $KCV$  найнижчі для металу РЗГ, а найвищі – для металу НЗГ (ліва частина на рис. 3). Крім того, ударна в'язкість металу всіх зон гину № 1 однозначно найнижча біля зовнішньої поверхні труби, а найвища - біля внутрішньої. Згідно з розподілом напружень розтягу в перерізі стінки труби найсприятливіші умови для повзучості металу виникають саме біля зовнішньої поверхні труби, де сумарні напруження розтягу, спричинені сукупним впливом всіх технологічних чинників (тиск пари, термічні напруження, різного роду згинальні і крутні моменти тощо), максимальні. Тому найслабший опір крихкому руйнуванню металу поверхневих шарів труби пов'язали з найінтенсивнішою деградацією металу цих шарів перерізу стінки труби внаслідок повзучості. Причому в РЗГ деградація вичерпала можливості металу чинити опір крихкому руйнуванню, оскільки в більшій частині перерізу труби його значення  $KCV$  суттєво нижче за  $KCU$ , регламентоване для сталі 12X1MФ. Оскільки ударні зразки руйнувалися на віддалі щонайменше 35 mm від експлуатаційного зламу гину № 1, то ударна в'язкість зразків з РЗГ, розташованих симетрично до лінії цього зламу, найімовірніше, була б ще нижчою.

Як правило, значення  $KCU$  для металу у вихідному стані на 25% перевищують значення  $KCV$ , оскільки під час визначення  $KCU$  враховують енергозатрати на зародження тріщини від дна тупого надрізу і на її поширення до руйнування, тоді як під час оцінювання  $KCV$  частка роботи на зародження тріщини мінімізується і енергозатрати в основному пов'язані з роботою на поширення руйнуван-

ня. Для експлуатованого металу різниця між цими характеристиками може досягати 40...50% [15]. Відомо також [16, 17], що експлуатаційна деградація сталі впливає саме на опір поширенню руйнування (який в основному характеризується значенням  $KCV$ ), а опір його зародженню (який в більшій мірі характеризується значенням  $KCU$ ) слабше залежить від експлуатаційної деградації. Навіть якщо перераховане значення  $KCU$  для металу РЗГ було б на 50% вищим за отримане  $KCV$ , то становило б лише  $0,17 \text{ MJ/m}^2$  (а це вже втричі менше за регламентоване). Отже, метал РЗГ вичерпав свої можливості чинити опір крихкому руйнуванню і, звісно, що перепади температури (особливо швидкоплинні), а отже, напружень у стінці труби полегшуватимуть поширення тріщиноподібних дефектів у цій зоні. Метал з такою низькою ударною в'язкістю особливо чутливий до водневої крихкості [18, 19], тобто схильний до розтріскування за впливу водню, абсорбованого металом під час експлуатації. Особливо сприятливі умови для реалізації такого руйнування виникають за охолодження парогонів до кімнатної температури під час зупинок блоків.

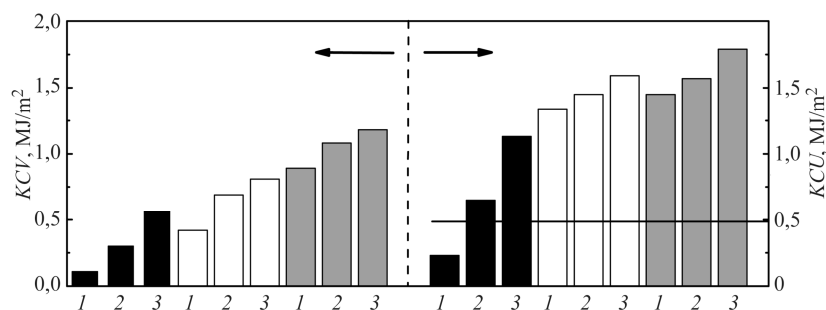


Рис. 3. Ударна в'язкість  $KCV$  сталі 12X1MΦ після  $\sim 286 \cdot 10^3$  h експлуатації на гинах № 1 (зліва) та  $KCU$  на № 2 (справа) головних парогонів ТЕС. Позначення див. рис. 2.

Fig. 3. Impact toughness  $KCV$  of the 12X1MΦ steel specimens after  $\sim 286 \cdot 10^3$  h of operation on bends № 1 (in the left part) and  $KCU$  on the № 2 (right) of the main steam pipelines of TPPs. Designations as in Fig. 2.

Що ж стосується ударної в'язкості сталі 12X1MΦ гину № 2, то підтвердилися закономірності її зміни і по товщині стінки труби, і в різних зонах гину, описані для металу гину № 1. В усіх зонах гину значення  $KCU$  біля зовнішньої поверхні труби найнижчі, а біля внутрішньої – найвищі. Згідно з вимогами регламенту значення  $KCU$ , визначені на тангенціально орієнтованих зразках Менаже, не повинні бути меншими за  $0,49 \text{ MJ/m}^2$ . І ця вимога порушена для сталі з розтягненої зони гину № 2 (як і для гину № 1). Отже, не дивлячись на відсутність наскрізного пошкодження, ресурс цього гину за опором крихкому руйнуванню вичерпаний і його слід було б замінити навіть за відсутності макротріщини на зовнішній поверхні труби в РЗГ.

### ВИСНОВКИ

Фрактографічно виявлено, що руйнування обох гинів головних парогонів ТЕС починається від зовнішньої поверхні труб за міжзеренним механізмом, властивим руйнуванню через повзучість. Межі міжзеренних фрагментів контрастно декоровані вторинними тріщинами, береги яких інтенсивно окиснені за тривалого впливу високої температури, що свідчить про їх формування під час експлуатації. Попри відповідність вимогам регламенту хімічного складу, твердості та механічних характеристик міцності, визначених на тангенціальних зразках сталі 12X1MΦ з практично усіх зон та по всій товщині стінки труб, гин № 1 зруйнувався з утворенням осьової тріщини в розтягненій зоні, через яку теплоносій витікав назовні. Тоді як за ідентичних умов експлуатації в гині № 2 виявили лише

неглибоку (до 8 mm) осьову тріщину. І це, не дивлячись на те, що міцність металу практично всіх зон гину № 2 нижча за регламентовану. За характеристиками пластичності метал гину № 1 (із наскрізним руйнуванням) відповідав нормативним вимогам, а гину № 2 (з поверхневими тріщинами у розтягненій зоні) – ні. Це пояснили тим, що зразки на розтяг вирізали з гину № 1 поза зоною, де досягалася критична деградація металу, тоді як з гину № 2 – безпосередньо в ній. Отже, деформація відбувалася в доволі вузькій смужі в околі лінії, що огинає зовнішню поверхню труби в РЗГ з мінімальною товщиною стінки. Значення ударної в'язкості *KCV* сталі з розтягненої зони гину № 1 майже втричі, а *KCU* гину № 2 вдвічі нижчі за регламентовані. Наднизький для такого класу сталей опір крихкому руйнуванню – пряма ознака досягнення металом розтягненої зони обох гинів критичної деградації.

*РЕЗЮМЕ.* Исследована сталь 12Х1МФ двух изгибов главных паропроводов ТЭС. Установлено, что они повреждены вследствие ползучести металла с реализацией межзеренного разрушения. Несмотря на соответствие металла всех зон (растянутой, нейтральной и сжатой) одного из изгибов требованиям к химическому составу, твердости и прочностным характеристикам при растяжении, в его растянутой зоне обнаружили сквозные осевые трещины. При этом в растянутой зоне другого изгиба обнаружили лишь неглубокую (до 8 mm) осевую трещину (причем, несмотря на то, что прочность металла практически всех его зон ниже регламентированного значения). Однако ударная вязкость металла растянутой зоны обоих изгибов ниже регламентированной (первого изгиба – почти втрое, а второго – вдвое). Сверхнизкое для такого класса сталей сопротивление хрупкому разрушению считали признаком критического технического состояния металла обоих изгибов.

*SUMMARY.* The 12Х1МФ steel of two bends of the main steam pipelines of TPP was investigated. It is established that they are damaged due to metal creep with intergranular fracture. In one of them, despite of the correspondence of the metal of all the bending zones to the requirements for the chemical composition, hardness and tensile strength characteristics, through axial cracks were found in its tension zone. In this case, despite the fact that the strength of the metal of almost all zones of the other bend is below the regulated value, only a shallow (up to 8 mm) axial crack was detected in its tension zone. However, the impact toughness of the metal of the tension zone of both bends was lower than the regulated value (for the first bend these values were almost three times and for the second one – twice lower). The resistance to brittle fracture, which was extremely low for such class of steels, was considered as a sign of achievement by the both bends metal of the critical technical state.

1. *Енергетична стратегія України на період до 2030 року: Електронний ресурс: режим доступу:* <http://energetyka.com.ua/normatyvna-baza/384-energetichna-strategiya-ukrajini-na-period-do-2030-roku>.
2. *Новиченко Л. М., Марфутин П. И., Мухомад Г. В.* Оценка ресурса безопасной эксплуатации оборудования ТЭС, отработавшего парковый ресурс // *Енергетика та електрифікація.* – 2008. – № 10 (302). – С. 3–6.
3. *Нахалов В. А.* Надежность гибов труб теплоэнергетических установок. – М.: Энергоиздат, 1983. – 216 с.
4. *Крутасова Е. И.* Надежность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
5. *Станюкович А. В.* Пути повышения ресурса и надежности гибов паропроводов ТЭЦ // *Тр. ЦКТИ.* – 1988. – Вып. 246.
6. *Бугай Н. В., Березина Т. Г., Трунин И. И.* Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.
7. *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. – **46**, № 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. Krechkov's'ka, A. D. Markov // Materials Science.* – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)

8. *Студент О. З., Никифорчин Г. М., Марков А. Д.* Особливості впливу водню на властивості і механізм руйнування металу зварних з'єднань паропроводів ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 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.)
9. *Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д.* Аномальний прояв високотемпературної деградації металу зварного з'єднання ошаднолегованої сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 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.)
10. *Студент О. З., Кречковська Г. В.* Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15Х1М1Ф після її експлуатації на парогонгах ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 5. – С. 19–26.  
(*Student O. Z. and Krechkovska 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.)
11. *Повзучість у водні експлуатованої сталі 2,25Cr-Мо / Л.О. Бабій, О.З. Студент, А. Загурський, А. Д. Марков* // Фіз.-хім. механіка матеріалів.- 2007. – №5. – С. 91-96.  
(*Creep of degraded 2.25 Cr-Mo steel in hydrogen / L.O. Babii, O.Z. Student, A. Zagorski, A.D. Markov* // *Materials Science* – 2007. – **43**, 5. – P. 701-707.)
12. *Діагностика водневого макророзшарування в стінці гину труби системи магістральних газопроводів / Л. Є. Харченко, О. Є. Кунта, О. І. Звірко, Р. С. Савула, З. А. Дурягіна* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 4. – С. 84–90.  
(*Diagnostics of hydrogen macrolamination in the wall of a bent pipe in the system of gas mains / L. E. Kharchenko, O. E. Kunta, O. I. Zvirko, R. S. Savula* // *Materials Science*. – 2016. – **51**, № 4. – P. 530–537.)
13. *ТУ 14-3460:2009 / ТУ У 27.2-05757883-207:2009.* Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – К.: Держстандарт України, 2009. – 50 с.
14. *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Довідн. пос. / Під заг. ред. З. Т. Назарчука. Т. 1: Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів / С. І. Крижанівський, О. П. Осташ, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, П. В. Ясній.* – Львів: Простір-М, 2016. – 360 с.
15. *Кречковська Г. В., Студент О. З.* Оцінювання деградації сталей парогонів за ударною в'язкістю на зразках з різною геометрією надрізу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 4. – С. 106–110.  
(*Krechkovska H. V. and Student O. Z.* Determination of the degree of degradation of steels of steam pipelines according to their impact toughness on specimens with different geometries of notches // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 4. – P. 566–571.)
16. *Effect of in-service degradation of trunk gas pipeline steel on its “in-bulk” properties / G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska, P. P. Zonta, O. T. Tsyurulnyk, K. Nikiforov, M. I. Hredil, D. Yu. Petryna, T. Vuherer* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 1. – С. 88–99.  
(*In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska, P. P. Zonta, O. T. Tsyurulnyk, K. Nikiforov, M. I. Hredil, D. Yu. Petryna, T. Vuherer* // *Materials Science*. – 2008. – **44**, № 1. – P. 104–119.)
17. *Impact toughness and deformation parameters of fracture of railway axle material / P. O. Maruschak, A. P. Sorochak, T. Vuherer, O. Prentkovskis, O. P. Yasniy, and R. T. Bishchak* // *Arabian J. for Science and Engin.* – 2016. – 41 (5). – P. 1647–1655.
18. *Dmytrakh I. M., Leshchak R. L., and Syrotyuk A. M.* Effect of hydrogen concentration on strain behaviour of pipeline steel // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2015. – **40**, № 10. – P. 4011–4018.
19. *Corrosion and stress corrosion cracking of exploited storage tank steel / A. Zagorski, H. Matysiak, O. Tsyurulnyk, O. Zvirko, H. Nykyforchyn, K. Kurzydowski* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 3. – С. 113–117.  
(*Corrosion and stress corrosion cracking of exploited storage tank steel / A. Zagorski, H. Matysiak, O. Tsyurulnyk, O. Zvirko, H. Nykyforchyn, K. Kurzydowski* // *Materials Science*. – 2004. – **40**, № 3. – P. 421–427.)

Одержано 01.01.2017