

УДК 621.325:669.539.43

Г. Кречковська; О. Студент, докт. техн. наук; І. Курнат

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

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ВОДНЕВОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ ВНАСЛІДОК ТЕПЛОЗМІН ПІД ЧАС ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ГОЛОВНИХ ПАРОГОНАХ ТЕС

Резюме. Запропоновано підхід для оцінювання технічного стану деградованого металу парогонів з урахуванням впливу пусків-зупинок енергоблоків ТЕС. Цей підхід дозволяє встановлювати можливість подальшого використання обладнання після довготривалої роботи. Моделювання пусків-зупинок проводилося в лабораторних умовах термоцикуванням зразків у чистому водні від робочої температури парогону до кімнатної температури. Зреалізовано цей підхід на сталях 12Х1МФ та 15Х1М1Ф за результатами випроб на циклічну тріщиностійкість після різної їх експлуатації на головних парогонях ТЕС і після термоцикування у водні. Визначили ефективний поріг циклічної тріщиностійкості й ефективний час експлуатації, враховуючи різну історію експлуатації. Згідно з цими даними побудовано базову діаграму для сталі 12Х1МФ та 15Х1М1Ф.

Ключові слова: високотемпературна воднева деградація, парогони ТЕС, теплостійкі сталі, зупинки технологічного процесу.

H. Krechkovska, O.Student, I.Kurnat

INTENSIFICATION OF HIGH-TEMPERATURE HYDROGEN DEGRADATION OF HEAT-RESISTANCE STEELS CAUSED BY HEAT CHANGES DURING EXPLOITATION ON THE MAIN STEAM PIPELINE OF A HEAT POWER PLANT

The summary. An approach for evaluation of technical state of degraded metal of steam pipelines taking into account shutdowns of the power units of power plant has been proposed. This approach enables to establish the possibility to use the equipment after long term service. Shutdowns were simulated in laboratory conditions by thermocycling of specimens in pure hydrogen from service temperature of steam pipelines to room temperature. This approach was realized by fatigue fracture testing of 15Kh1M1F and 12Kh1MF steels after different service time and number of shutdowns during exploitation on the heat power plant steam pipelines and after thermocycling in hydrogen. The effective fatigue crack growth resistance thresholds have been determined and the effective operation time has been calculated using the service history data. According to this data the basic diagram for assessment of the 15Kh1M1F and 12Kh1MF steels state has been developed.

Key words: high temperature hydrogen degradation, steam pipeline HPP, heat-resistance steel, shutdown technological process.

Питання взаємодії конструкційних металів і сплавів із воденьвмісними середовищами вже впродовж багатьох років не втрачає своєї актуальності [1,2]. На сьогодні цю взаємодію фахівці з теплоенергетичної галузі визнають однією з найнебезпечніших причин втрати роботоздатності обладнання. Крім того, за теперішніх умов експлуатації енергоблоків ТЕС у маневровому режимі їх пуски-зупинки стали не винятком, а правилом [3]. Унаслідок нагрівання та охолодження елементів конструкцій в них виникають додаткові термічні напруження, які, сумуючись з напруженнями від внутрішнього тиску в парогонях, можуть спричиняти закритичні напруження [4]. Це полегшує зародження й поширення тріщин у трубах. Шкідливий вплив абсорбованого металом водню призводить до його деградації, яка проявляється виникненням

пошкоджень у конструкції, що поширюються аж до її руйнування. Проте цьому відносно швидкому етапу деградації передують значно повільніший етап, який не обов'язково пов'язаний з дефекто- чи тріщиноутворенням, а проявляється зміною суб- і мікроструктури і, як наслідок, погіршенням механічних властивостей металу [5–8]. Зміна структури металу під час експлуатації контролюється швидкістю дифузійного перерозподілу вуглецю та елементів легування, яка, як відомо [9, 10], зростає під впливом водню, інтенсифікуючи структурні зміни в металі, а швидкість перерозподілу залежить і від температури, і від напружень [11–12]. Крім того, концентрація водню в околі тріщин, може істотно перевищувати середній для металу його рівень [10, 13]. Прямим доказом цього є значний градієнт концентрації водню, зафіксований у напрямі від поверхні реального зламу парогону в глибину металу. Зміна мікроструктури металу парогонів під час їх тривалої високотемпературної експлуатації пришвидшуватиметься через вплив і наводнювання, і додаткових напружень розтягу, що виникають під час пусків-зупинок енергоблоків. При цьому, в першу чергу, скорочуватиметься етап деградації металу на структурному рівні з відповідною зміною механічних властивостей, а вже як наслідок цього – час до зародження тріщин і загальна довговічність конструкції.

Мета роботи – оцінити технічний стан експлуатованого металу парогонів з урахуванням впливу зупинок технологічного процесу під час експлуатації блоків ТЕС.

Об'єкт дослідження. Головні парогони, якими перегріта пара потрапляє від котла на турбіну, відносять до особливо небезпечних та відповідальних елементів енергоблоків ТЕС. Зазвичай їх виготовляють з оцценолегованих теплостійких сталей 15X1M1Ф та 12X1MФ. Ці сталі термічно обробляються в заводських умовах на етапі виготовлення труб за типовою технологією (15X1M1Ф: нормалізація від температури 1040 °С після витримання 40 хв, охолодження зі швидкістю > 5 °С/хв, відпуск при 740 °С упродовж 3 год, а 12X1MФ: нормалізація на повітрі від 980 °С з тригодинним відпуском за температури 740 °С). Хімічний склад досліджених сталей наведено в таблиці 1, а їх механічні властивості – в таблиці 2.

Таблиця 1. Хімічний склад досліджених сталей (% mass)										
Сталь	C	Cr	Mo	V	Co	Ni	Si	Mn	S	P
15X1M1Ф	0,16	1,39	0,97	0,29	0,017	0,20	0,30	0,91	0,017	0,021
12X1MФ	0,10	1,10	0,26	0,17	-	-	0,26	0,54	0,019	0,015

Таблиця 2. Механічні властивості досліджених сталей у вихідному стані							
12X1MФ				15X1M1Ф			
σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	ψ , %	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	ψ , %	δ , %
445	285	74	30	530	340	63	20

Якщо судити за співвідношенням границь текучості та міцності, то у вихідному стані обидві сталі мали майже однаковий запас пластичності, (в обох випадках $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,64$, що є нижчим за регламентований для цих сталей максимальний рівень $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,7$

[14]).

Для врахування впливу зупинок технологічного процесу на технічний стан деградованого металу головних парогонів ТЕС дослідили сталь 15Х1М1Ф, яка експлуатувалася за температури до 545 °С і тиску до 24 МПа та сталь 12Х1МФ, яка працювала за температури до 540 °С і тиску до 14 МПа. Труби зі сталі 15Х1М1Ф мали діаметр 325 мм і товщину стінки 60 мм, а сталі 12Х1МФ – 325 і 38 мм відповідно.

Для обґрунтування вибору металу для досліджень проаналізували вибірки даних щодо тривалості експлуатації та кількості планових і вимушених зупинок технологічного процесу для обох сталей (рис. 1а, б). При цьому брали до уваги тривалість експлуатації τ_{op} металу на парогоні, кількість вимушених $N_{вим}$ та загальну кількість N_3 зупинок технологічного процесу впродовж експлуатації. Адже під час експлуатації мають місце планові $N_{план}$ (передбачені технологічним регламентом для профілактики та усунення виявлених пошкоджень) та вимушені $N_{вим}$ (через позаштатні ситуації) зупинки технологічного процесу. При цьому $N_{\Sigma} = N_{план} + N_{вим}$.

Для досліджень вибрали метал з двох блоків, які практично за однакової тривалості експлуатації $\tau_{op} \sim 2 \cdot 10^5$ год найбільше відрізнялися за кількістю зупинок технологічного процесу і за співвідношенням $N_{вим}/N_3$ (рис. 1). Для сталі 15Х1М1Ф цій умові відповідав метал з блоків №2 та №6 (рис. 1а). Згідно з даними з історії їх експлуатації кількість зупинок другого блока становила $N_3 = 501$, $N_{вим} = 219$, а шостого – $N_3 = 576$, $N_{вим} = 283$. Для сталі 12Х1МФ вибрали метал з блоків №1 та №10 (рис. 1 б). Зразки з експлуатованого металу вирізували з вертикальних ділянок парогонів різних блоків, які експлуатувалися за практично однакових температурно-силових умов експлуатації.

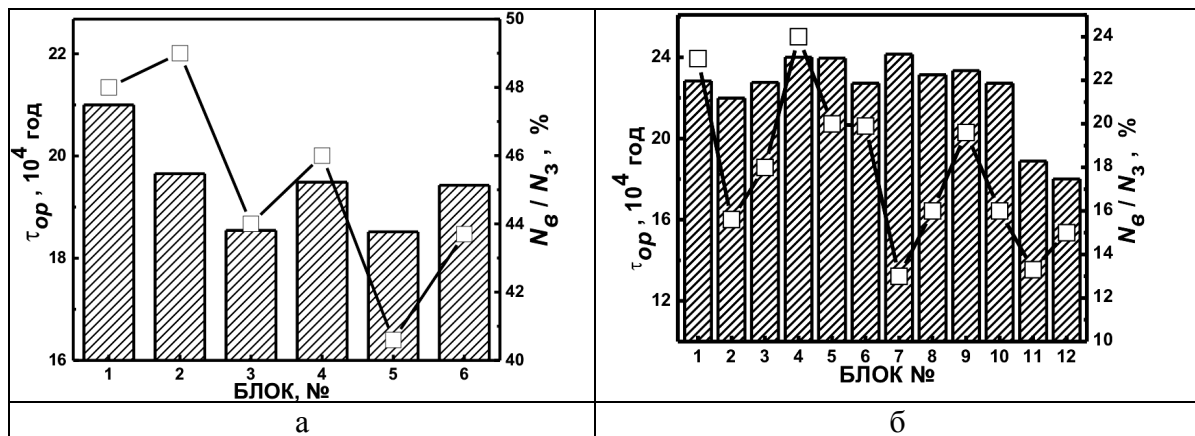


Рисунок 1. Тривалість експлуатації τ_{op} (стовпчики) та відсоток вимушених зупинок $N_{вим}$ від їх загальної кількості N_3 (крива) для сталей 15Х1М1Ф (а) та 12Х1МФ (б) з головних парогонів ТЕС

Методика досліджень. Для моделювання в лабораторних умовах деградації сталей внаслідок пусків-зупинок технологічного процесу використали метал з труб запасу. Деградацію металу досягали термоцикуванням зразків у газоподібному водні під тиском 0,3 МПа від кімнатної до максимально можливої для парогонів температури 570 °С з витримуванням за кожної з них упродовж 1 год [15,16].

Для оцінювання стану деградованого металу використали локальні показники механіки руйнування, а саме, порогові показники циклічної тріщиностійкості (ЦТ), які виявили високу чутливість до зміни стану деградованого металу [17,18].

Характеристики ЦТ визначали на повітрі за результатами циклічного навантаження консольним згином балкових зразків ($10 \times 20 \times 160$ мм) з крайовим надрізом. Зразки вирізували безпосередньо з труб, орієнтуючи їх уздовж осі труби. Ріст тріщини в них відбувався поперек стінки труби в радіальному напрямі. Частота циклів навантаження під час випроб на ЦТ становила $f = 10$ Гц а коефіцієнта асиметрії циклу навантаження – $R=0$. За результатами випроб будували кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) в координатах швидкість росту втомної тріщини (РВТ) da/dN від номінального (ΔK) і ефективного (ΔK_{eff}) розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН). Під час визначення ΔK_{eff} враховували ефект закриття тріщини (ЗТ). З КДВР визначали номінальний $\Delta K_{th} = K_{th\ max} - K_{th\ min}$ та ефективний $\Delta K_{th\ eff} = K_{th\ max} - K_{th\ cl}$ порогові розмахи КІН. Величину $K_{th\ cl}$, що характеризує ЗТ і відповідає частині циклу навантаження, впродовж якої метал в околі вершини тріщини циклічно не деформується, визначали методом зміни податливості зразка в циклі навантаження [19]. Завдяки локальності ефективного поріг ЦТ віддзеркалює зміни технічного стану металу внаслідок експлуатації і дозволяє судити про рівень деградації металу [20].

Результати роботи. Інтенсивність деградації парогінних сталей у лабораторних умовах залежить від кількості їх термоциклів у водні [15]. Відомо також, що під час експлуатації парогонів відбувається, по-перше, наводнювання металу з пари [13], а, по-друге, його деградація, яка залежить від тривалості експлуатації τ_{op} в експлуатаційних умовах [21]. Разом з тим останнім часом у зв'язку з переходом теплоенергетичного устаткування на маневрений режим експлуатації все переконливішими стають негативні наслідки впливу частіших зупинок технологічного процесу на втрату металом парогонів їх роботоздатності. Це засвідчують, у першу чергу, результати неруйнівного контролю парогонів, в яких все частіше в околі зварних з'єднань чи концентраторів напружень виявляють тріщиноподібні дефекти [22, 23].

З урахуванням цього реальний стан експлуатованого металу доцільно оцінювати не за номінальною τ_{op} , а за ефективною тривалістю експлуатації τ_{eff} сталі, при визначенні якої брати до уваги кількість зупинок технологічного процесу. Причому через можливу відмінність режиму охолодження системи під час планових та вимушених зупинок враховували не лише сумарну кількість, але і кількість вимушених зупинок:

$$\tau_{eff} = \tau_{op} [1+k], \quad (1)$$

$$k = m \cdot (N_{вум} / N_{\Sigma})^p. \quad (2)$$

При цьому τ_{eff} враховує, що через неминучі зупинки технологічного процесу ефективна тривалість експлуатації є більшою, ніж номінальна. Коефіцієнт m враховує різний вплив швидкості охолодження під час вимушених і планових зупинок технологічного процесу на інтенсивність деградації металу, а p – на інтенсивність його наводнювання при цьому.

За розрахованими значеннями τ_{eff} і отриманими після механічних випроб рівнями $\Delta K_{th\ eff}$ побудували базові залежності $\Delta K_{th\ eff} - \tau_{eff}$ для двох найуживаніших на головних парогонках ТЕС теплостійких сталей. На їх основі можна судити про реальний стан металу, який підлягає експертизі, без механічних випробувань зразків з нього, якщо відома достовірна інформація про кількість зупинок технологічного процесу, які мали місце під час його експлуатації. Тоді за порашованою на основі даних з історії експлуатації металу на парогоні ефективною тривалістю τ_{eff} з базової залежності можна визначити відповідний йому рівень $\Delta K_{th\ eff}$.

Для обґрунтування τ_{eff}^c , яке характеризує стан металу, деградованого до критичного рівня, використали результати випроб зразків після деградації в лабораторних умовах за умов їх термоциклування в газоподібному водні. Якщо погодитися з припущенням, що механічний показник стану металу (в нашому випадку це $\Delta K_{th\ eff}$) описує стан металу незалежно від умов, за яких відбувалась його деградація (лабораторні чи експлуатаційні), то

за критичне значення механічного показника стану металу слід вважати значення $\Delta K_{th\,eff}^c$, отримане в точці перетину залежностей $\Delta K_{th\,eff} - n$ (n – кількість термоциклів у водні в лабораторних умовах) для наводненого і дегазованого після термоциклування у водні металу. Тоді метал з таким самим рівнем $\Delta K_{th\,eff}^c$, але деградований в експлуатаційних умовах, можна вважати також деградованим до критичного рівня. Тоді, проектуючи значення $\Delta K_{th\,eff}^c$, отримане за випроб металу, деградованого в лабораторних умовах, на базову діаграму $\Delta K_{th\,eff} - \tau_{eff}$ для сталі, деградованої в експлуатаційних умовах, можна за величиною критичного рівня $\Delta K_{th\,eff}^c$ визначати критичне значення технологічного показника τ_{eff}^c . Тоді про стан металу на проміжних етапах його експлуатації можна судити з базової залежності без проведення механічних випробувань на основі підрахунків для нього значень τ_{eff} . При цьому, якщо отримане з базової залежності значення $\tau_{eff} \leq \tau_{eff}^c$, то подальша експлуатація металу є можливою. Якщо ж $\tau_{eff} > \tau_{eff}^c$, то абсорбований металом під час експлуатації водень може знижувати $\Delta K_{th\,eff}$ цього металу і тим самим сприяти його непрогнозованому чинними документами руйнуванню.

Для реалізації підходу прийняли, що швидкість охолодження під час вимушених зупинок може в 5 разів перевищувати швидкість охолодження під час планових зупинок. Завдяки цьому кількість залишкового водню в металі може бути істотно вищою після вимушеної зупинки порівняно з плановою і цю невідповідність описали квадратичною залежністю. З урахуванням цього коефіцієнт k у виразі (1) для визначення ефективної тривалості експлуатації τ_{eff} з урахуванням впливу зупинок визначили як

$$k = 5 \cdot (N_{вум} / N_{\Sigma})^2 \quad (3)$$

Використавши вищеописаний підхід, побудували базові діаграми $\Delta K_{th\,eff} - \tau_{eff}$ для сталей 12Х1МФ (рис. 2) та 15Х1М1Ф (рис. 3). Вони дозволяють оцінювати реальний технічний стан цих основних теплостійких сталей, деградованих в експлуатаційних умовах, без вирізування металу з парогонів для виготовлення зразків для механічних досліджень.

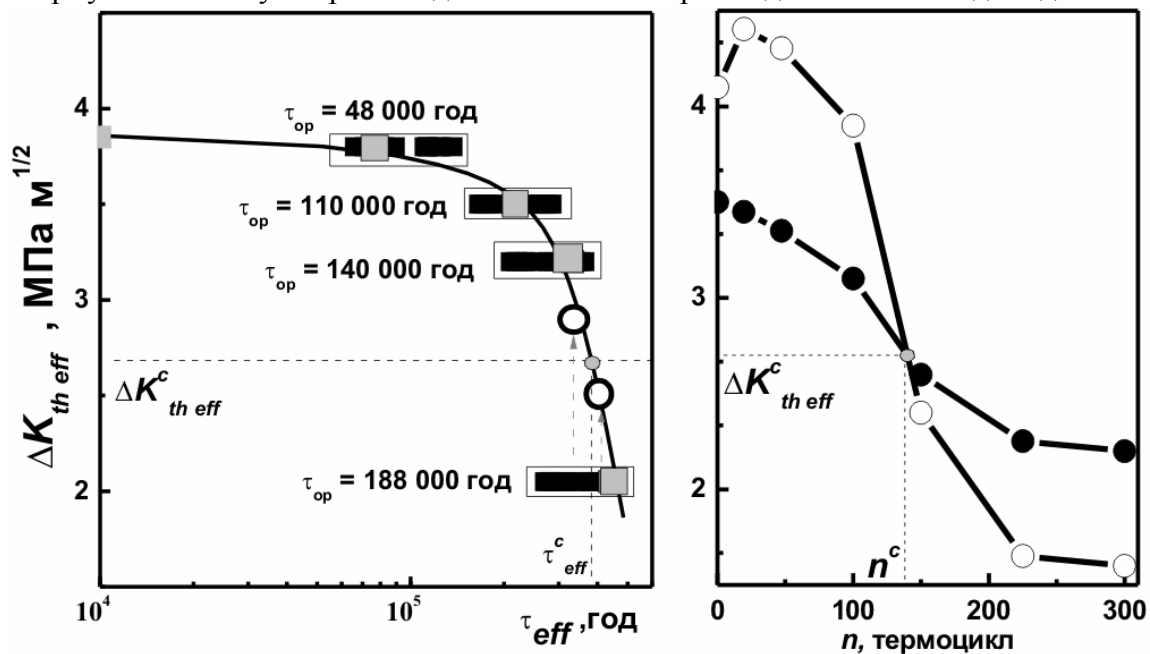


Рисунок 2. Базова діаграма $\Delta K_{th\,eff} - \tau_{eff}$ (ліва частина рисунка: ■ – точки, отримані з випроб сталі на ЦТ з визначенням $\Delta K_{th\,eff}$ та з розрахунку τ_{eff} за формулою (1); ■ – точки, отримані лише з розрахунку τ_{eff}) для визначення роботоздатності сталі 12Х1МФ після номінальної тривалості експлуатації τ_{op} на парогоні ТЕС та експериментально визначені величини $\Delta K_{th\,eff}$ залежно від кількості термоциклів у водні n (права частина рисунка: 1 – наводнений, 2 – дегазований після термоциклування у водні метал)

для сталі, деградованої в лабораторних умовах. Стан металу, деградованого до критичного рівня, характеризують точки $(\tau_{eff}^c; \Delta K_{th eff}^c)$ та $(n_c; \Delta K_{th eff}^c)$

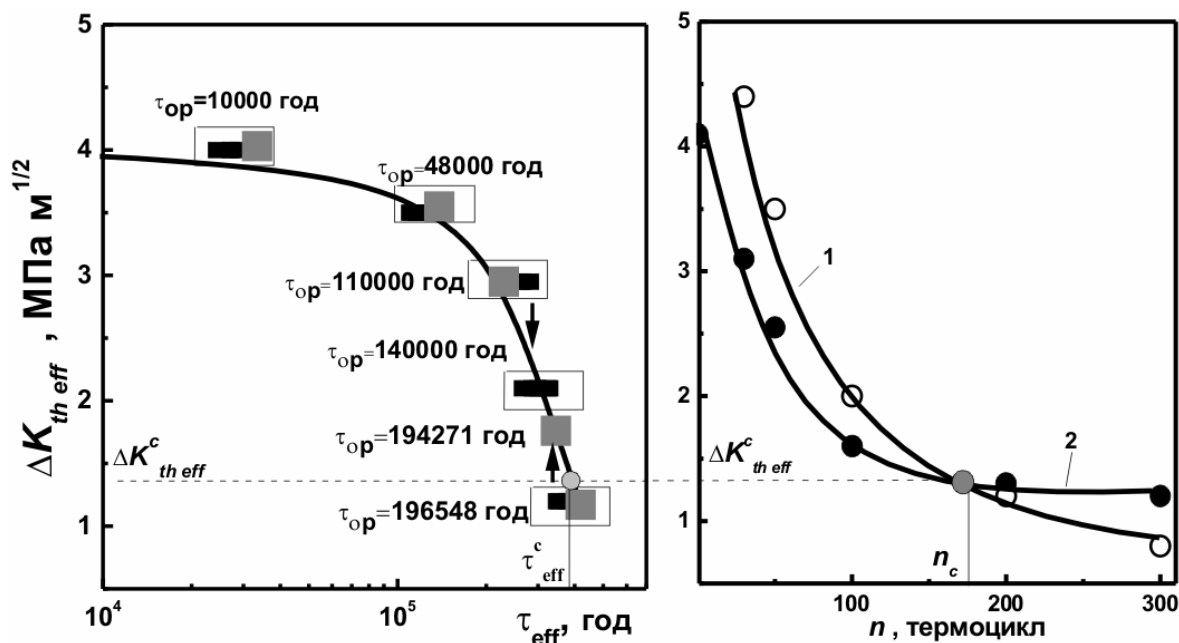


Рисунок 3. Базова діаграма $\Delta K_{th eff} - \tau_{eff}$ (ліва частина рисунка: ■ – точки, отримані з випроб сталі на ЦТ з визначенням $\Delta K_{th eff}$ та з розрахунку τ_{eff} за формулою (1); ■ – точки, отримані лише з розрахунку τ_{eff}) для визначення роботоzдатності сталі 15X1M1Ф після номінальної тривалості експлуатації τ_{op} на парогонках ТЕС та експериментально визначені величини $\Delta K_{th eff}$ залежно від кількості термоциклів у водні n (права частина рисунка: 1 – наводнений, 2 – дегазований після термоциклування у водні метал) для сталі, деградованої в лабораторних умовах. Стан металу, деградованого до критичного рівня, характеризують точки $(\tau_{eff}^c; \Delta K_{th eff}^c)$ та $(n_c; \Delta K_{th eff}^c)$

Для цього достатньо проаналізувати дані з історії експлуатації металу на реальному об'єкті (а саме, номінальну тривалість експлуатації за експлуатаційних умов τ_{op} , кількість вимушених зупинок технологічного процесу та їх сумарну кількість) і вирахувати ефективну тривалість експлуатації металу τ_{eff} згідно з виразами (1 та 2). Відклавши на осі абсцис базової діаграми (ліві частини рис. 2 або 3) отримане значення τ_{eff} та провівши від цієї точки вертикаль до перетину з базовою залежністю $\Delta K_{th eff} - \tau_{eff}$, отримаємо на діаграмі точку $(\tau_{eff}^i; \Delta K_{th eff}^i)$. Якщо ця точка перетину лежатиме лівіше і вище за точку з координатами $(\tau_{eff}^c; \Delta K_{th eff}^c)$, яка відповідає металу, деградованому до критичного рівня, то експлуатацію аналізованого металу можна продовжити. У протилежному випадку, коли точка перетину вертикалі з базовою залежністю $\Delta K_{th eff} - \tau_{eff}$ розташовується правіше і нижче точки критичного стану, стає можливим руйнування елемента під час подальшої експлуатації внаслідок негативного впливу абсорбованого металом водню на механічний показник його роботоzдатності $\Delta K_{th eff}$.

На прикладі сталі 12X1MФА показано, що за практично однакової тривалості експлуатації, але різної кількості зупинок технологічного процесу метал з блока, який під час експлуатації зупиняли частіше за механічним показником роботоzдатності $\Delta K_{th eff}$ виявився істотно гіршим, ніж взятий з блока, який зупиняли рідше.

Як наслідок з урахуванням механічних випробувань на циклічну тріщиностійкість сірі точки зі смуги порахованих значень τ_{eff} для тестованих сталей перемістилися на базову діаграму у вигляді білих точок (рис. 2, ліва частина). А це означає, що всі точки з усіх смуг порахованих значень τ_{eff} можна спроектувати на базову залежність $\Delta K_{th eff} -$

τ_{eff} і таким чином визначити для кожного з аналізованих матеріалів його технічний стан за показником $\Delta K_{th\,eff}$ без проведення механічних випробувань на циклічну тріщиностійкість.

Цей висновок підтверджено також на прикладі сталі 15X1M1Ф після її експлуатації на головних парогонях блоків №2 і 6 ТЕС. Показано, що незважаючи на практично однакову номінальну тривалість експлуатації τ_{op} , роботоздатність металу з блока №6, який за час експлуатації переніс меншу кількість зупинок технологічного процесу, не досягла критичного рівня і його можна продовжувати експлуатувати. Разом з тим, роботоздатність металу з іншого блока №2, який за той самий час експлуатації переніс більшу кількість зупинок технологічного процесу, досягла критичного рівня і його подальша експлуатація загрожує непрогнозованими пошкодженнями парогону. Цей результат є прямим підтвердженням впливу кількості зупинок технологічного процесу на інтенсивність високотемпературної водневої деградації металу, експлуатованого на головних парогонях ТЕС.

Висновки. За результатами випроб на циклічну тріщиностійкість та даними історії експлуатації теплостійких сталей на парогонях ТЕС побудовано базові залежності $\Delta K_{th\,eff} - \tau_{eff}$ для сталей 15X1M1Ф та 12X1МФ, які дають змогу прогнозувати роботоздатність деградованого металу головних парогонів ТЕС з урахуванням інтенсифікуючого впливу зупинок технологічного процесу на деградацію сталей. Ці діаграми дають можливість прогнозувати роботоздатність металу на проміжних етапах експлуатації без проведення механічних випроб. Для цього потрібно порівняти значення τ_{eff} для експлуатованого металу з критичним значенням ефективної тривалості експлуатації τ_{eff}^c . Якщо $\tau_{eff} \leq \tau_{eff}^c$, то подальша експлуатація металу є безпечною, якщо ж $\tau_{eff} > \tau_{eff}^c$, то водень, абсорбований металом під час експлуатації, може знижувати його циклічну тріщиностійкість і спричиняти передчасні пошкодження.

Література

1. Швед, М.М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водовода [Текст] / М.М. Швед. – К.: Наукова думка, 1985. – 120 с.
2. Ткачов, В.І. Проблеми водневої деградації металів [Текст] / В.І. Ткачов // Фіз-хім механіка матеріалів. – 2000. – №4. – С. 7–14.
3. Забара, Ю. Вихід завжди є [Текст] / Ю. Забара. – Обрій ПІБ. – 2002. – №24 (82).
4. Panasyuk, V.V. Strength and Fracture of Solids with Cracks. – Lviv: NASU, Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2002. – 468 p.
5. Бабій, Л.О. Оцінювання високотемпературної водневої деградації теплостійких сталей реакторів гідрокрекінгу нафти [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук. – Львів, 2011.
6. Дзіоба, І.Р. Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах [Текст] / І.Р. Дзіоба // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – №3. – Т.46. – С. 67–72.
7. Структурна мікропошкоджуваність сталей парогонів ТЕС [Текст] / О.П. Осташ, А.І. Кондир, О.В. Вольдемаров, П.В. Гладиш, М.В. Куречко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 3. – С. 13–23.
8. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12X1МФ на характеристики її тріщиностійкості [Текст] / О.М. Романів, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, І.Р. Дзіоба, Б.П. Лонюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – № 1. – С. 101–104.
9. Похмурский, В.И. Влияние водню на диффузионные процессы в металлах [Текст] / В.И. Похмурский, В.В. Федоров. – Львів: Еней, 1998. – 207 с.
10. Панасюк, В.В. Теоретический анализ роста трещин в металлах при воздействии водовода [Текст] / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.С. Харин // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – №4. – С. 61–75.
11. Студент, О.З. Особливості впливу водню на порогові характеристики циклічної тріщиностійкості конструкційних сталей [Текст] / О.З. Студент // Машинознавство. – 1999. – № 2. – С. 17–23.
12. Студент, О.З. Вплив водню на механічні властивості реакторної сталі 15X2МФА [Текст] / О.З. Студент // Там же. – 1999. – № 4. – С. 23–29

13. Вайнман, А. Современное состояние проблемы водородного охрупчивания металла тепломеханического оборудования ТЭС до- и сверхкритических параметров. – В кн.: Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій [Текст] / А. Вайнман; под ред. В.В. Панасюка – Львов: Физ.-мех. ин-т. НАНУ, 2004. – С. 445–456.
14. ДНАОП 0.00-1.11-98. Про затвердження Правил будови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води [Електронний ресурс] – 224 с.– Режим доступу: <http://www.licasoft.com.ua/>).
15. Student O.Z. An accelerated method of hydrogen degradation of structural steels by thermocycling. – Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – 34, №4. – С. 45–52. (Student O.Z. Accelerated method for hydrogen degradation of structural steel // Material Science. – 1998. – 34, №4. – P. 497–507.)
16. Студент, О.З. Методика швидкісного високотемпературного старіння сталей [Текст] / О.З. Студент, Б.П. Лонюк. – 1997. – № 6. – С. 111–112. (Student O.Z., Loniuk B.P. A method for fast high-temperature aging of steels // Materials Science. – 1997. – 33, №6. – С. 865-866.)
17. Effect of damage in service of 12Kh1MF steam-pipe steel on its crack resistance characteristics / Romaniv O.M., Nykyforchyn H.M., Dzyuba I.R., Student O.Z., Lonyuk B.P. // Materials Science. – 1998. – 34, №1. – P. 110–114.
18. Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафто- та паропроводів [Текст] / 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.
19. Романив, О.Н. Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов [Текст] / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин, Б.Н. Андрусив // Физ.-хим. механика материалов. – 1983. – №3. – С. 47–61.
20. Student, O. Hydrogen effect on properties of heat resistance steels after their high temperature hydrogen degradation in laboratory and service conditions [Електронний ресурс] / O. Student // Proc. 18th European Conference on Fracture, ECF-18: “Fracture of Materials and Structures from Micro and Macro Scale”, Dresden, Germany, 2010.
21. Студент, О.З. Новый підхід до оцінки залишкового ресурсу металу паропроводів [Текст] / О.З. Студент // Вісник Тернопільського державного технічного університету.–1998. – 3, №4. – С. 54–62.
22. Дзіоба, І.Р. Про сучасний підхід SINTAP та його використання для оцінки роботоздатності зварних з'єднань парогонів ТЕС [Текст] / І.Р. Дзіоба, О.З. Студент, А.Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – № 6. – С. 70–80.
23. Назарчук, З.Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник: У 3 т. – Т.3. Засоби та застосування методу акустичної емісії [Текст] / З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський. – К.: Наукова думка, 2009. – 327с.