

**ПОРІГ ЦИКЛІЧНОЇ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ЯК ПОКАЗНИК
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ВОДНЕВОЇ ДЕГРАДАЦІЇ
НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНОГО
ТА НАФТОХІМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, А. Д. Марков

**FATIGUE THRESHOLD AS A PARAMETER OF HIGH-
TEMPERATURE HYDROGEN DEGRADATION OF LOW-ALLOY
STEELS USED FOR POWER AND PETROCHEMICAL EQUIPMENT**

G. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, A. D. Markov

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

Abstract. In order to substantiate the choice of workability factor for the evaluation of mechanical state of metal, we have compared various mechanical factors by their sensitivity to high-temperature hydrogen degradation. Just local factors of fracture mechanics (such as fracture toughness and threshold Stress Intensity Factor) were found to be the most sensitive to such changes, and therefore subsequently Stress Intensity Factor was used as indicator of mechanical state of the metal with different degradation level. The inversion of effect of hydrogen, absorbed by degraded metal, on its effective threshold of cyclic crack resistance depending on number of thermocycles in hydrogen and exploitation time has been revealed. The metal state when negative effect of absorbed hydrogen on its effective threshold appears is suggested to be limiting.

Експлуатація великогабаритних об'єктів енергетики, нафтохімії та інших базових для України галузей виробництва відбувається, як правило, за жорстких умов їх високотемпературної експлуатації та дії наводнювальних середовищ і високих напружень. Така багатofакторність експлуатаційних впливів ускладнює вирішення важливої проблеми прогнозування їх роботоzдатності. З одного боку, її визначає зміна фазового складу металу в процесі експлуатації [1, 2], а з іншого – шкідливий локальний вплив розчиненого в металі водню [3]. Крім того, водень у металі сприяє його водневому окрихченню і, як наслідок, передчасному руйнуванню [4, 5] та інтенсифікує дифузiю елементів [6], чим може пришвидшити структурні перетворення в металі.

Проблема ускладнюється тим, що на сьогодні розрахунковий ресурс устаткування більшості підприємств в цих галузях або вже вичерпаний, або на межі вичерпування. Для обгрунтованого продовження терміну їх експлуатації потрібна достовірна інформація про властивості експлуатованого металу на проміжному етапі експлуатації. Це передбачає вирізання металу з реальних елементів конструкцій після різної тривалості їх експлуатації в технологічному процесі, що не завжди можливо. Використання зразків-свідків також має свої обмеження, оскільки не враховує всіх експлуатаційних чинників, зокрема впливу напружень. Найприйнятнішим для цієї мети є імітація експлуатаційної деградації сталей лабораторним старінням за параметрів, вищих ніж технологічні, (зокрема, за вищої температури) з наступною екстраполяцією на робочі. Вона зменшує час старіння і є достатньо ефективною для прогнозування в'язких руйнувань внаслідок повзучості, але не дає можливість передбачити крихкі руйнування, які щодалі частіше трапляються в цих галузях.

Використання лабораторних методик старіння металу передбачає підтвердження відповідності деградації в лабораторних і експлуатаційних умовах за певними механічними показниками. Традиційні механічні властивості, такі як міцність, пластичність, тривала міцність, залишкова деформація, не завжди достатньо чутливо відбивають структурні зміни, зумовлені експлуатацією, особливо в низьколегованих теплостійких сталях. Зокрема, залишкова деформація зруйнованих елементів парогонів

ТЕС майже на порядок менша за нормований у галузі її критичний рівень [3]. Отже, гостро постає проблема пошуку таких показників працездатності, які б адекватно відбивали структурні зміни в металі, зумовлені експлуатацією. На прикладі статичної тріщиностійкості $K_{Ic}(J_{Ic})$, яка відбиває опір матеріалу руйнуванню в області, сумірній з характерними елементами мікроструктури, показано переваги використання для цієї мети підходів механіки руйнування [7]. Вища локальність параметрів циклічної тріщиностійкості свідчить про кращі перспективи їх використання для оцінки структурної деградації металу та локального впливу розчиненого в ньому водню.

Мета роботи – виявити закономірності впливу водню на механічні показники роботоздатності конструкційних сталей після їх високотемпературної деградації, вибрати показники, чутливі до таких змін, та обґрунтувати критерій досягнення металом граничного стану.

Методичні особливості. Для обґрунтування вибору механічного показника, чутливого до деградації, оцінили вплив тривалості експлуатації малолегованої теплостійкої сталі 12Х1МФ на парогонях ТЕС на зміну її механічних властивостей. Використали відомі показники роботоздатності: механічні характеристики міцності (границя текучості $\sigma_{0,2}$) і пластичності (відносне звуження ψ) за розтягу, характеристики статичної (критичне значення J -інтеграла – J_{Ic} та зміна його поточного значення залежно від приросту тріщини dJ/da , визначені за кімнатної та робочої для паропроводів температур) і циклічної (розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK за різних швидкостей росту втомної тріщини (РВТ) da/dN , а саме 10^{-5} , 10^{-7} , 10^{-10} м/цикл) тріщиностійкості цієї сталі. Визначаючи їх, дотримувались відомих рекомендацій [8]. Для порівняння оцінили чутливість до деградації металу величини зерна фериту d , визначену з допомогою комп'ютерної обробки металографічних зображень [9].

Для імітації в лабораторних умовах структурних змін у металі, властивих експлуатації, використали розроблену раніше методику старіння сталей у водні [10], яка полягає у швидкісному термоцикуванні у водні ($p_{H_2} = 0,5$ МПа) зразків у температурному діапазоні 20-570 °С.

Крім того, вивчали старіння сталі 15Х2МФА ($\sigma_b = 610$ МПа, $\sigma_{0,2} = 470$ МПа, $\delta = 25\%$, $\psi = 79\%$) у водні, яке здійснювали витримуванням зразків у герметичній камері за умов: тиск водню - $0,5 \pm 0,05$ МПа, температура – 450 ± 5 °С, напруження розтягу у нетто-перерізі зразків - 0, 120 або 240 МПа, база старіння – 750 або 2200 год. Повзучості зразків впродовж бази випробувань не зауважили навіть за найвищого рівня напружень розтягу у нетто-перерізі. Детальніше методику старіння описано в роботі [10]. Зразки досліджували або відразу після завершення процесу старіння у водні, вважаючи, що внаслідок їх охолодження у водневій атмосфері вони є насичені воднем, або після додаткової одноденної дегазації за температури 450 °С у вакуумі, допускаючи, що цього часу достатньо, щоб основна частина дифузійно-рухомого водню залишила метал.

Зістарені зразки навантажували за схемою консольного згину віднулевим циклом частотою $f = 10$ Гц. Підростання тріщини заміряли оптично на бічних поверхнях. Закриття тріщини оцінювали методом податливості [11], визначаючи коефіцієнт закриття тріщини U та ефективний розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) $\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$. За результатами випробувань будували кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) в номінальних $da/dN - \Delta K$ та ефективних $da/dN - \Delta K_{eff}$ координатах.

Результати досліджень та їх аналіз

Обґрунтування механічного показника, чутливого до деградації. Виявилось, що чутливість до зміни стану деградованого металу зростає від випробувань за одновісного розтягу з визначенням інтегральних характеристик короткочасної міцності до випробувань за об'ємного розтягу, який реалізується під час експериментів на циклічну тріщиностійкість зразків із концентратором напружень або тріщиною з

визначенням локальних параметрів механіки руйнування. Порівняння за чутливістю різних показників робоздатності деградованої в експлуатаційних умовах сталі 12Х1МФ дозволяє зробити висновок, що не інтегральні, а локальні параметри механіки руйнування високо чутливі до зміни стану деградованого металу (рис. 1).

Критерієм, за яким визначають придатність парогонів до подальшої експлуатації, є накопичена під час експлуатації сумарна залишкова деформація елемента конструкції та швидкість повзучості, які інтегрально відтворюють зміни в металі протягом його експлуатації [12]. Разом з тим досить часто експертиза з використанням оптичного мікроскопа металу парогонів, що експлуатувались за температури 540...570 °С під тиском 14 МПа, не виявляє скупчень пор навіть поблизу зламів, отриманих внаслідок експлуатаційних пошкоджень. При цьому елементи парогонів руйнуються без видимих ознак відчутної деформації і їх залишкова деформація є на порядок меншою за нормований критичний рівень. Причиною погіршення робоздатності сталей після експлуатації може бути не лише вичерпування пластичності і розвиток мікропошкоджень, але й зміна під час високотемпературної експлуатації вихідної структури сталі через збіднення твердого розчину елементами легування і виникнення складнолегованих карбідів, розвиток сфероїдизації і коагуляції карбідів. Тому зниження ефективного порогу циклічної тріщиностійкості, який характеризує опір руйнуванню в локальному об'ємі металу, що в кілька разів менший за величину зерна, зумовлене, на нашу думку, структурними змінами в металі під час його високотемпературної деградації в експлуатаційних умовах. Про це свідчить зниження $\Delta K_{th\,eff}$ практично від початку експлуатації металу парогону. Після того, як розсіпання границь між феритними і перлітними зернами в структурі металу практично завершується і вони перестають ідентифікуватись на протравленому шліфі (після 11...14·10³ год експлуатації), зниження $\Delta K_{th\,eff}$ стає значно стрімкішим і на залежності $\Delta K_{th\,eff} - \tau_{op}$ з'являється перегин [13].

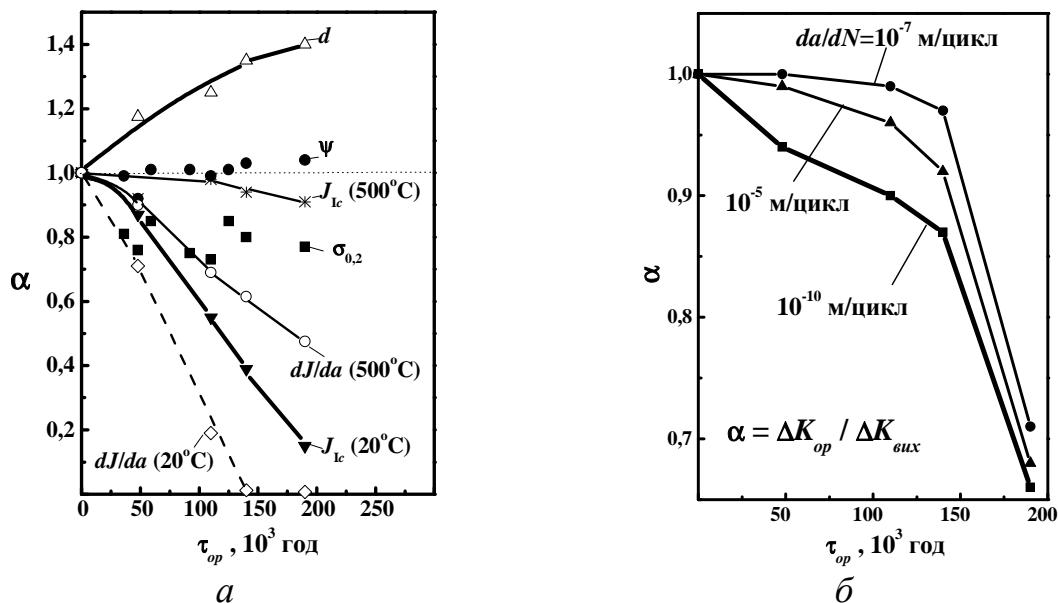


Рис. 1. Часові залежності коефіцієнтів α , що характеризують стан сталі 12Х1МФ залежно від тривалості її експлуатації τ_{op} за показниками: структурний (розмір зерна фериту d), інтегральні механічні (ψ , $\sigma_{0,2}$) та локальні механічні (J_{1c} та dJ/da за температури випробувань 20 і 500 °С [14] та ΔK для різних швидкостей РВТ).

Отже, найефективніше оцінювати працездатність металу парогонів після їх тривалої високотемпературної експлуатації за зміною не інтегральних властивостей, а за зміною локального показника, яким є ефективний пороговий рівень циклічної тріщиностійкості $\Delta K_{th\,eff}$. Як параметр стану металу він має ще одну перевагу. З врахуванням високого вмісту водню під поверхнею реальних зламів попри інтегрально не високий вміст водню в

експлуатованому металі [4], саме такий локальний показник роботоздатності дозволить виділити роль абсорбованого металом водню на його опір руйнуванню.

Інверсія впливу абсорбованого деградованим металом водню на пороги втоми.

На рис. 2 наведено результати досліджень впливу швидкісного термоцикування (в діапазоні 20-570 °С) у газоподібному водні зразків зі сталі 12Х1МФ та наступної за старінням у водні додаткової дегазації (витримування впродовж 1 год при 570 °С у вакуумі) на характеристики порогової циклічної тріщиностійкості. Вплив внутрішнього дифузійно-рухомого водню оцінювали за коефіцієнтом впливу водню β_{H_2} , який визначали як відношення відповідних порогових показників для наводнених та дегазованих зразків.

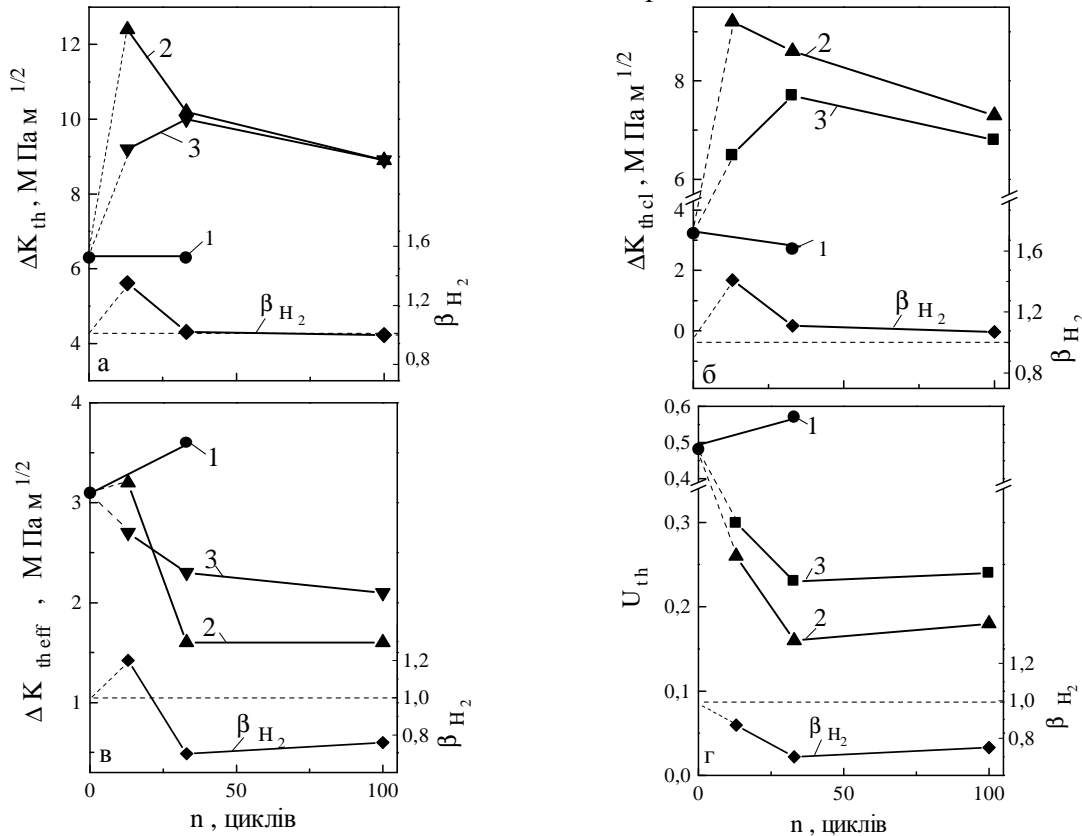


Рис. 2. Порогові характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 12Х1МФ в залежності від кількості термоциклів на повітрі (1), у водні (2) та після додаткової дегазації після термоцикування у водні (3): а - ΔK_{th} ; б - $\Delta K_{th,cl}$; в - $\Delta K_{th,eff}$; г - U_{th} .

Аналізуючи вплив термоцикування на пороги втоми доходимо висновку, що номінальний поріг втоми ΔK_{th} та пороговий КІН закритої частини циклу $\Delta K_{th,cl}$ для наводнених зразків є вищими порівняно з дегазованими незалежно від кількості термоциклів n . Це, очевидно, зумовлено специфікою ефекту закриття тріщини. Для наводненого металу характерне більше галуження тріщини та криволінійність її траєкторії порівняно із дегазованим, що зумовлює більшу шорсткість поверхні руйнування і, відповідно, підвищує ефект закриття тріщини. Для ефективного порогу втоми $\Delta K_{th,eff}$ виявлено інверсію впливу внутрішнього водню в залежності від кількості термоциклів, яка полягає у тому, що позитивний вплив водню після 13 термоциклів змінюється на негативний після 33 та 100 термоциклів.

Подібний результат неоднозначного впливу внутрішнього дифузійно-рухомого водню на $\Delta K_{th,eff}$ залежно від рівня напружень розтягу під час старіння в лабораторних умовах отримано також на сталі 15Х2МФА. На рис. 3 наведено залежності, які ілюструють вплив рівня напружень під час старіння у водні на порогові показники тріщиностійкості сталі 15Х2МФА та на їх відносну зміну стосовно відповідних показників для дегазованого після старіння металу (за коефіцієнтами β_{H_2}). Аналізуючи їх, вважали, що порогові показники дегазованого після старіння у водні металу відзеркалюють в основному зміну стану

металу внаслідок старіння, а присутність у металі водню є додатковим чинником впливу на порогові характеристики втоми. Як випливає з рис. 3, всі порогові показники циклічної тріщиностійкості зразків з дифузійно рухомим воднем змінюються неоднозначно, переходячи через екстремум після старіння під навантаженням при $\sigma = 120$ МПа. Лише $\Delta K_{th\,eff}$ монотонно знижується, однозначно засвідчуючи погіршення працездатності металу внаслідок старіння. Аналіз результатів випробування дегазованих зразків і їх порівняння

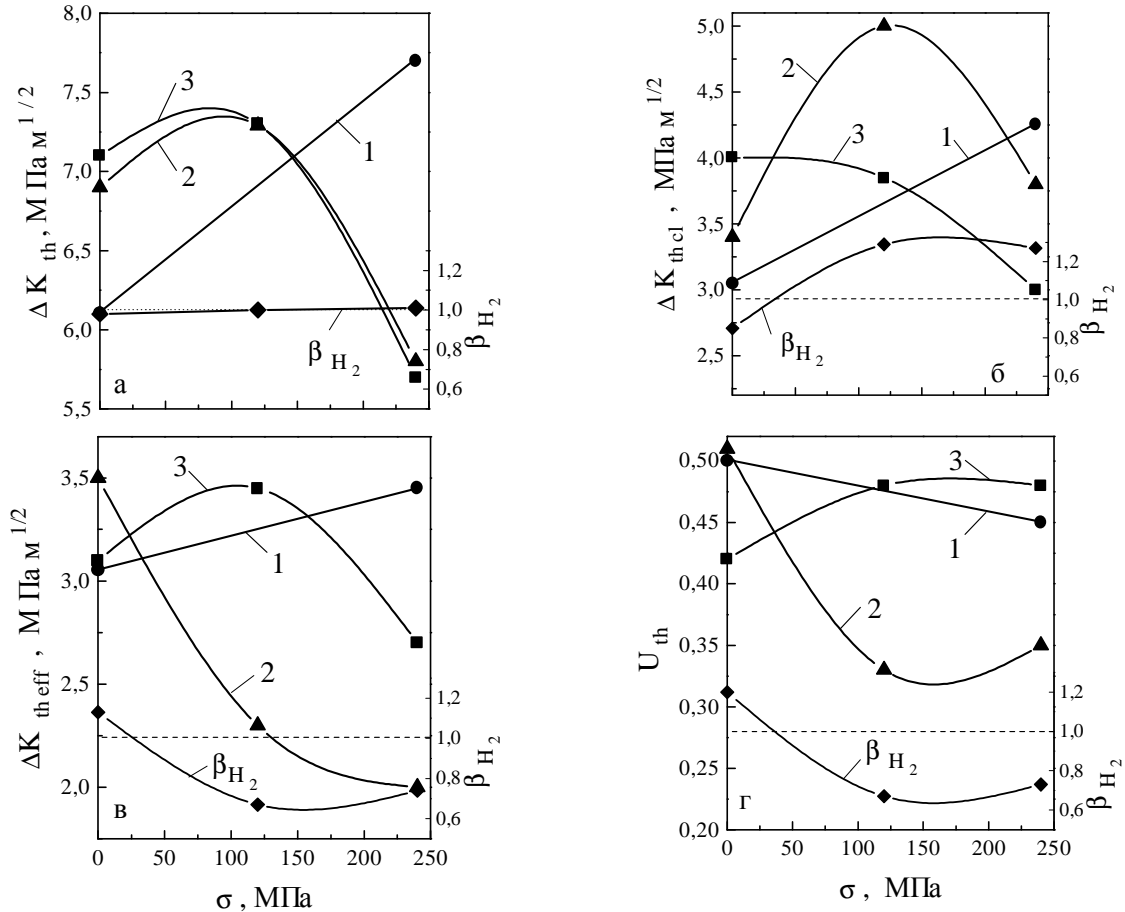


Рис. 3. Порогові характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 15X2MFA в залежності від рівня напружень під час старіння на повітрі (1), у водні (2) та після додаткової дегазації після старіння у водні (3): а - ΔK_{th} ; б - $\Delta K_{th\,cl}$; в - $\Delta K_{th\,eff}$; г - U_{th} .

з відповідними, але не дегазованими, виявляє неоднозначність впливу абсорбованого металом водню на порогові показники росту втомної тріщини. Старіння металу у ненапруженому стані зумовлює позитивний вплив внутрішнього водню на параметри $\Delta K_{th\,eff}$ і U_{th} , але негативний на ΔK_{th} , $\Delta K_{th\,cl}$. Наявність напружень розтягу в зразку під час його старіння спричиняє інверсію впливу водню і його позитивний вплив на $\Delta K_{th\,eff}$ і U_{th} змінюється на негативний, а негативний вплив стосовно ΔK_{th} , $\Delta K_{th\,cl}$ – на позитивний. Якщо судити за зміною коефіцієнтів β_{H_2} , то абсорбований металом водень практично не впливає на номінальний поріг ΔK_{th} ($\beta_{H_2} \approx 1$), підвищує $\Delta K_{th\,cl}$ після старіння під навантаженням, що через закриття тріщини зумовлює зниження рівня $\Delta K_{th\,eff}$ після старіння при $\sigma = 120$ МПа.

Таким чином, до відомого раніше дуалізму впливу водню на ріст втомних тріщин в залежності від рівня міцності сталі [15, 16], температури випробування [16, 17] додається дуалізм впливу внутрішнього дифузійно-рухомого водню, абсорбованого металом під час термоцикування чи ізотермічного витримування під навантаженням у високотемпературному водні. Відомо [15, 16], що підвищення порогів втоми під впливом газоподібного водню за умов високочастотного навантаження властиве лише для сталей з низьким та середнім рівнем міцності, а їх зниження - високоміцним сталям. Старіння у водні, інтенсифікуючи процеси деградації сталей, зумовлює

негативний вплив водню на ефективні пороги втоми при практично незмінному рівні міцності сталі. Це означає, що за характером впливу водню на $\Delta K_{th\ eff}$ високопластичні у вихідному стані сталі 15X2МФА та 12X1МФ після старіння у водні відповідно під напруженням $\sigma = 240$ МПа впродовж 2200 год та після 33 термоциклів можна прирівняти до високоміцних сталей. Останнє слід розглядати як пересторогу, оскільки навіть інтегрально незначний вміст водню в металі після тривалої експлуатації може створювати у неоднорідно напруженому металі локальні ділянки перенасичення, а значить, суттєво знижувати їх поріг втоми. Таким чином, такий підхід дозволяє виявити схильність металу до окрихчення, яку не завжди вдається виявити іншими методами досліджень.

Ключовим питанням прогнозування високотемпературної працездатності конструкційного матеріалу є обґрунтування гранично-припустимого рівня деградації його механічних властивостей, внаслідок досягнення якого імовірність руйнування різко зростає. Виявлена неоднозначність впливу дифузійно-рухомого внутрішнього водню на ефективні пороги втоми в залежності від рівня деградації металу, зумовленого старінням у водні, може послужити основою для цього. Старіння металу внаслідок сумісної дії впродовж певного часу водню, температурних та силових чинників спочатку призводить до позитивного впливу водню на ефективний поріг ЦТ. В міру накопичення пошкоджень у металі позитивний вплив водню зменшується, а починаючи з деякого рівня пошкоджень у металі, змінюється на негативний. Рівень деградації металу, оцінений за пороговими характеристиками циклічної тріщиностійкості, при якому настає інверсія впливу водню на ефективний поріг втоми з позитивного на негативний, безумовно небезпечний з точки зору подальшої експлуатації. На цій основі пропонується за гранично-припустимий стан металу вважати такий стан, при якому спостерігається інверсія впливу абсорбованого металом водню на ефективний поріг втоми з позитивного на негативний. Такий стан виникає в сталі 12X1МФ після 20-25 термоциклів у водні (рис. 2), а в сталі 15X2МФА – після 3 місяців ізотермічного витримування у водні за напружень, які перевищують 30 МПа (рис. 3).

Отримані результати можуть бути використані із метою прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій, які експлуатуються в умовах сумісного впливу високих температур та наводнюючих середовищ. Для цього в основу розрахунків залишкової довговічності слід закладати, з одного боку, кінетику зміни механічного параметру, чутливого до процесів високотемпературної деградації, а з іншого – гранично-припустимий рівень цього параметра. В нашому випадку це порогове значення ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень, граничний рівень якого визначається за зміною характеру впливу абсорбованого металом водню з позитивного на негативний.

Висновки

1. Короткочасна міцність та пластичність за одновісного розтягу при кімнатній температурі є недостатньо чутливими до структурних змін в малолегованих теплостійких сталях, зумовлених експлуатацією. Локальні параметри механіки руйнування, зокрема, в'язкість руйнування J_{Ic} за кімнатної та dJ/da за кімнатної і робочої температури, чутливіші до зміни стану металу внаслідок його тривалої експлуатації.
2. Комплексне дослідження порогових показників циклічної тріщиностійкості теплостійкої сталі 12X1МФ виявило, що найлокальніший з відомих механічних параметрів механіки руйнування – ефективний поріг циклічної тріщиностійкості $\Delta K_{th\ eff}$ – адекватно описує зміни в металі, зумовлені його деградацією, однозначно знижується зі збільшенням тривалості експлуатації і тому його пропонується використовувати для оцінки зміни стану деградованого металу.
3. Показано дуалізм впливу внутрішнього дифузійно-рухомого водню на ефективний поріг циклічної тріщиностійкості в залежності від степені деградації металу

внаслідок старіння у газоподібному водні. З'ясовано, що після досягнення певного рівня деградації металу абсорбований металом водень може додатково знижувати ефективний поріг циклічної тріщиностійкості.

4. Запропоновано вважати стан металу, при якому з'являється негативний вплив абсорбованого металом водню на ефективний поріг циклічної тріщиностійкості, за гранично припустимий.

Робота виконана за підтримки Українського науково-технологічного центру, грант № 1628 .

Література

1. Крутасова Е.И. Надежность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоиздат. – 1981. – 240 с.
2. Березина Т.Г. Структурный метод определения остаточного ресурса длительно работающих паропроводов. – Теплоэнергетика. – 1986. - №3. – С. 53-56.
3. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления / А.Б. Вайнман, Р.К. Мелехов, О.Д. Смиян / Отв. ред. И.И. Василенко, АН УССР. – К.: Наук. думка, 1990. – 272 с.
4. Швед М.М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. - К.: Наук. думка, 1985. - 120 с.
5. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 217 с.
6. Похмурский В.И., Федоров В.В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Еней, 1998. – 207 с.
7. Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафто- та паропроводів / В.В. Панасюк, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, З.В. Слободян // Зб. "Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій". - 2002. Вип. 5. – С. 537-546.
8. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
9. Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О.З. Студент, Б.П. Русин, Б.В. Кисіль та інш. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – № 1. – С. 22–28.
10. Student O. Z. Accelerated method of hydrogen degradation of structural steel // Physicochemical Mechanics of Materials. - 1998. - № 4. - P. 45 - 52.
11. Оценка эффекта закрытия усталостных трещин. / Никифорчин Г. Н., Андрусив Б. Н., Вольдемаров А. В., Куцын М. А. // Физ.хим. механика материалов. – 1982. – №5. – С. 100-103.
12. Нахалов В. А. Надежность гибов труб теплоэнергетических установок. – М: Энергоиздат, 1983.
13. Студент О.З. Особливості впливу водню на порогові характеристики циклічної тріщиностійкості конструкційних сталей. // Машинознавство. - 1999. - №2. - с. 17-23.
14. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості / Романів О.М., Никифорчин Г. М., Студент О.З., та ін. // Там же. - 1998. - №1. - С. 101-104.
15. Romaniv O.M., Nykyforchyn G.M., Kozak L.Yu. Fatigue crack growth in structural steels under the influence of gaseous environments // Proc. 7th Europ. Conf. Fracture, ECF-7, 1988. EMAS, 1988. – V. 2. – P. 1153 - 1155.
16. Nykyforchyn G.M., Schaper M., Student O.Z., Skrypnyk I.D. Fatigue crack growth kinetics and mechanisms in steel at elevated temperatures in gaseous hydrogen // Proc. 10th Biennial Europ. Conf. Fracture, ECF-10, Berlin, 1994. - Warley, U.K.: EMAS, 1994. – V. 2. – P. 1265 - 1270.
17. Никифорчин Г.М., Студент О.З., Скрипник І.Д. Двоєкий вплив водню на ріст втомних тріщин у жароміцній сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1994. – 30. - №4. - С. 7 - 15.