

УДК 620.17; 620.184.6

**Г.В. Кречковська**

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

**ФРАКТОДІАГНОСТИКА СТАНУ СТАЛІ 15X1M1Ф ПІСЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ПАРОГОНАХ ТЕС З УРАХУВАННЯ МАНЕВРОВОГО РЕЖИМУ РОБОТИ**

Проаналізовано фрактографічні ознаки руйнування на ділянці припорогового росту втомної тріщини за випроб на циклічну тріщиностійкість сталі 15X1M1Ф у вихідному стані та після 20 років експлуатації на парогонях ТЕС з різною кількістю (500 і 576) зупинок технологічного процесу. Фасетки міжзеренного руйнування на фоні класичного крізьзеренного втомного рельєфу на припороговій ділянці втомного руйнування експлуатованої сталі запропоновано вважати діагностичною ознакою її деградації. Частка площі міжзеренного руйнування використано як кількісну характеристику для діагностування технічного стану сталі після її високотемпературної експлуатації за впливу наводнювального технологічного середовища. Чим більшу кількість зупинок експлуатувався метал, тим більше таких ознак деградації на зламі, а самі вони рельєфніші. Отримано кореляційну залежність між часткою міжзеренного руйнування  $D$  та ефективним пороговим рівнем циклічної тріщиностійкості  $\Delta K_{th\,eff}$  для експлуатованої сталі, яку описали рівнянням прямої. Її пропонується використовувати для оцінювання в першому наближенні технічного стану металу.

**Ключові слова:** парогони ТЕС, фрактографічні ознаки деградації, пуски-зупинки, ефективний поріг циклічної тріщиностійкості, фрактодіагностика.

**Г.В. Кречковская****ФРАКТОДІАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ СТАЛІ 15X1M1Ф ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПАРОПРОВОДАХ ТЭС С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОСТАНОВОВ ПРОЦЕССА**

Проанализировано фрактографические признаки разрушения на участке припорогового роста усталостной трещины при испытаниях на циклическую трещиностойкость стали 15X1M1Ф в исходном состоянии и после 20 лет эксплуатации на паропроводах ТЭС с разным количеством (500 и 576) остановок технологического процесса. Фасетки межзеренного разрушения на фоне классического трансзеренного усталостного рельефа на припороговой участке усталостного разрушения эксплуатируемой стали предложено считать диагностическим признаком ее деградации. Доля площади межзеренных разрушения использовано как количественную характеристику для диагностирования технического состояния стали после ее высокотемпературной эксплуатации при воздействии наводнювальной технологической среды. Чем больше количество остановок эксплуатировался металл, тем больше таких признаков деградации на изломе, а сами они рельефнее. Получено корреляционная зависимость между долей межзеренных разрушения  $D$  и эффективным пороговым уровнем циклической трещиностойкости  $\Delta K_{th\,eff}$  для эксплуатируемой стали, которую описали уравнением прямой. Ее предлагается использовать для оценки в первом приближении технического состояния металла.

**Ключевые слова:** парогонь ТЭС, фрактографични признаку деградації, пуски-остановки, эффективный порог циклической трещиностойкости, фрактодіагностика.

**H.V. Krechkovska****FRACIODIAGNOSTICS OF THE 15X1M1Ф STEEL STATE AFTER SERVICE ON THE STEAM PIPELINES OF HPP WITH ACCOUNT OF THE SHUT-DOWN PROCESSES EFFECT**

Fractographic signs of destruction at the area of the threshold fatigue crack growth during cyclic crack resistance tests of the 15X1M1F steel in the virgin state and after 20 years of operation on pipeline thermal power plants with different number (500 and 576) shut-downs of the technological process were analysis. The intergraining facet of destruction on background of classical transgraining fatigue relief on the near-site fatigue was proposed exploited considered diagnostic sign of degradation. Share Intergrain area of destruction used as a quantitative measure for diagnosing the technical condition of steel after high temperature exposure operation for irrigating technological environment. The more stops operated metal, especially following signs of degradation at the turn, and they vividly. An correlation dependence between the share Intergrain  $D$  and effective destruction threshold level of fatigue crack growth resistance  $\Delta K_{th\,eff}$  exploited for steel, which is described by the equation line. It is proposed to use for evaluating a first approximation the technical state of the metal.

**Keywords:** pipelines of thermal power plants, fractographic signs of degradation, shutdown, the effective threshold of cyclic crack resistance, fractodiagnosics.

**Актуальність.** Для з'ясування впливу технологічних чинників експлуатації елементів енергетичного устаткування на технічний стан матеріалів, з яких вони виготовлені, традиційно використовують традиційні механічні характеристики тривало експлуатованих сталей. Але через недостатню їх чутливість до деградації сталей прогнозувати залишковий ресурс деградованих сталей на їх основі не вдається. Для його оцінювання слід знати закономірності зміни механічних характеристик конструкційних матеріалів за сумісного впливу різних технологічних чинників (зокрема тривалості експлуатації, зупинок технологічного процесу, температурно-силового режиму експлуатації, робочого середовища). Та найголовніше слід обґрунтувати критичний стан

деградованого металу, за досягнення якого подальша експлуатація елементів конструкцій стає небезпечною.

Розвиток і впровадження технічної діагностики як способу оцінювання реального технічного стану металу сприяє зниженню витрат на ремонт і скороченню термінів простою устаткування. Експлуатаційну надійність і довговічність конструкційних елементів неможливо підвищити без ефективної системи технічної діагностики та врахування висновків експертиз щодо причин експлуатаційних руйнувань. Запобігання аварійним руйнуванням відповідальних елементів є одним з найважливіших завдань технічної діагностики. Проблема технічного діагностування елементів трубопроводів на етапі їх виготовлення та впродовж наступної експлуатації актуальна для енергетики [1] і для інших відповідальних об'єктів в хімічній та нафтопереробній промисловості.

Мікрофрактографічний аналіз є потужною складовою матеріалознавчих досліджень, який спрямований на з'ясування механізмів руйнування та встановлення їх зв'язку з мікроструктурою металу. З його використанням якісно оцінюють енергоємність руйнування, особливо коли макрорівний характер руйнування супроводжується крихким руйнуванням на макрорівні. З використанням цього фізичного методу досліджень аналізують поверхні експлуатаційних зламів та зламів зразків, зруйнованих в модельних лабораторних умовах навантаження. Особливо ефективно застосування цього методу в механіці руйнування, коли на мікрорівні вивчають особливості руйнування, ув'язуючи їх з напружено-деформованим станом у вершині тріщини. За такими особливостями можна навіть кількісно оцінювати напружений стан у вершині тріщини у параметрах механіки руйнування [2].

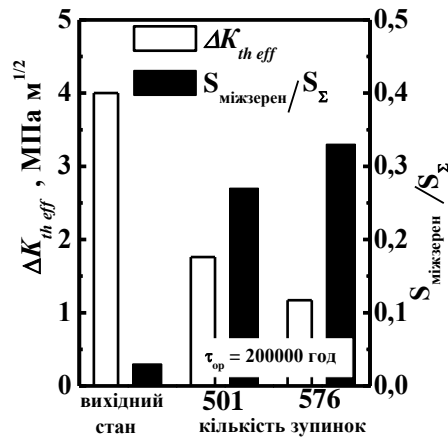
Фрактографічні дослідження лабораторних зразків, зруйнованих за контрольованих умов випробування, можуть бути ефективним доповненням на етапі проектування конструкційних елементів (з огляду на можливість врахування впливу структурних концентраторів напружень в експлуатованому металі), дають можливість корегувати технологічні чинники їх експлуатації на певних етапах експлуатації та обґрунтувати граничний стан експлуатованого елемента на основі знання про його можливості чинити опір руйнуванню після досягнення критичної деградації. Оскільки механізми накопичення пошкоджень як правило визначаються не лише структурними особливостями металу та його механічними властивостями, але ще й умовами експлуатації, то слід поглибити дослідження та узагальнення даних щодо виокремлення впливу технологічних експлуатаційних чинників на деградацію елементів відповідальних конструкцій, які працюють за жорстких температурно-силових умов.

Найперспективнішим є поєднання фрактографічного аналізу поверхонь руйнування матеріалу, дослідження структурних ознак деградації та механічних характеристик експлуатованих матеріалів. Якщо встановити зв'язок між інформативними фрактографічними ознаками руйнування, структурними ознаками та механічними характеристиками до різної міри деградованих матеріалів, то фрактографічне діагностування може стати основою для прогнозування поточного технічного стану експлуатованих конструкційних матеріалів.

**Об'єкт досліджень.** Дослідили особливості руйнування сталі 15X1M1Ф у вихідному стані та після експлуатації на двох блоках головних парогонів ТЕС. Особливістю досліджуваного металу було те, що за однакової тривалості експлуатації ( $\sim 2 \cdot 10^5$  год) на двох різних блоках ТЕС він істотно відрізнявся за кількістю зупинок технологічного процесу (один із блоків зупиняли 501 раз, а інший – 576 разів). Аналізували поверхні зламів зразків у вихідному стані та після експлуатації на парогоніях ТЕС, випробуваних на циклічну тріщиностійкість (ЦТ). Балкові зразки  $8 \times 16$  мм в перерізі з одностороннім концентратором, навантажували за схемою консольного згину. За результатами випроб визначали ефективні (з урахуванням закриття тріщини) порогові значення циклічної тріщиностійкості  $\Delta K_{th\ eff}$ . Фрактографічні дослідження особливостей, характер руйнування металу та поширення в ньому тріщин проводили на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

**Основні результати дослідження.** За технологічні чинники впливу на роботоздатність металу головних парогонів ТЕС прийняли номінальну тривалість експлуатації сталі  $\tau_{op}$  у наводнювальному середовищі (пара високих параметрів) та кількість зупинок технологічного процесу. Вплив цих чинників на технічний стан металу на інтегральні характеристики та локальні параметри механіки руйнування проаналізовано раніше [3-5]. Показано, що випробі на циклічну тріщиностійкість, а саме експериментально отримані номінальні ( $\Delta K_{th}$ ) і ефективні ( $\Delta K_{th\ eff}$ ) порогові рівні ЦТ найчутливіші до зміни технічного стану металу внаслідок експлуатації. Проведені дослідження виявили також, що і номінальний, і ефективний порогові ЦТ однозначно

нижчі для сталі, яка впродовж однакової тривалості експлуатації перенесла більшу кількість зупинок технологічного процесу. Причому вплив деградації, спричиненої зростанням кількості зупинок, на рівень  $\Delta K_{th\,eff}$  значно сильніший, ніж на рівень  $\Delta K_{th}$ . Це пов'язано з високим закриттям тріщини (ЗТ), спричиненим деградацією сталі. Якщо ефективний поріг ЦТ порівняно з номінальним для сталі у вихідному стані знизився в 2.1, то після експлуатації на блоці з меншою кількістю зупинок – у 2.8, а на блоці з більшою їх кількістю – у 3.7 разів [6]. Отже, ефективний поріг ЦТ  $\Delta K_{th\,eff}$  найчутливіший до деградації і однозначно знижується в міру зростання кількості зупинок за однакової тривалості експлуатації сталі на парогонях ТЕС (рис. 1).



**Рис. 1. Пороговий рівень ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K_{th\,eff}$  та частка міжзеренного відколу на поверхнях зламів на припороговій ділянці росту тріщини для сталі у вихідному стані та після  $\tau_{op} \sim 2 \cdot 10^5$  год експлуатації з різною кількістю зупинок технологічного процесу з охолодженням головних парогонів ТЕС.**

Виникнення закриття тріщини звичло пов'язують із залишковою пластичністю [7], шорсткістю поверхні зламу [8], автокаталітичним нарощуванням товщини оксидних плівок [9], завдяки яким матеріал в околі вершини тріщини впродовж певної частини циклу навантаження ( $\Delta K_{cl}$ ) циклічно не деформується. Важливо з'ясувати, який з цих чинників відповідальний за ЗТ, спричинене інтенсифікацією деградації сталі під впливом зупинок технологічного процесу. Для з'ясування цього використали фрактографічні дослідження втомних зламів за припорогової швидкості росту втомної тріщини.

Фрактографічні дослідження сталі 15Х1М1Ф у вихідному стані виявили, що на припорогій ділянці росту тріщини переважало типове крізьзеренне руйнування з формуванням псевдоріздкового рельєфу з переорієнтацією цих борідок від зерна до зерна (рис. 2а), яке властиве високопластичним матеріалам у вихідному стані, з подальшим формуванням фестонів, перетинки між якими руйнувалися з ознаками доволі високої пластичної деформації. В'язкі втомні борізки поперек фестонів, перпендикулярні до магістрального напрямку РВТ, почали виявляти за вищої роздільної здатності лише за швидкості, що відповідає початку другої ділянки кінетичної діаграми втомного руйнування (рис. 2б). З цього зробили висновок, що в цьому випадку ефект ЗТ можна зв'язати з високою залишковою пластичністю та шорсткістю поверхні зламу, зв'язану із сходінками на переходах між фестонами.

На зламах експлуатованої сталі виявилися елементи окрихчення (рис. 3). Сліди пластичного деформування під час руйнування перетинок між суміжними фестонами стали інтенсивнішими, а сліди від неметалевих включень на зламах свідчили про їх явне відшарування від матриці (рис. 3а). Крім того на припороговій ділянці руйнування на зламах виявили значне вторинне мікророзтріскування з фрагментацією металу на субструктурному рівні. Ці вторинні тріщинки контрастно декорували втомні борізки, що є ознакою окрихчення металу (рис. 3б). Але найістотніша особливість це поява на зламах експлуатованої сталі вже за припорогової швидкості росту тріщини фасеток міжзеренного відколу (рис. 3д). Причому у випадку сталі, яка перенесла більшу кількість зупинок, ці всі особливості виявлялися чіткіше (рис. 3г-е). Зрозуміло, що міжзеренні фасетки, які виступають над загалом плитким утомним зломом (особливо велика їх кількість в сталі, яка перенесла більшу кількість зупинок), спричиняють істотну шорсткість поверхні і тому саме їх вважали відповідальними за значний ефект ЗТ.

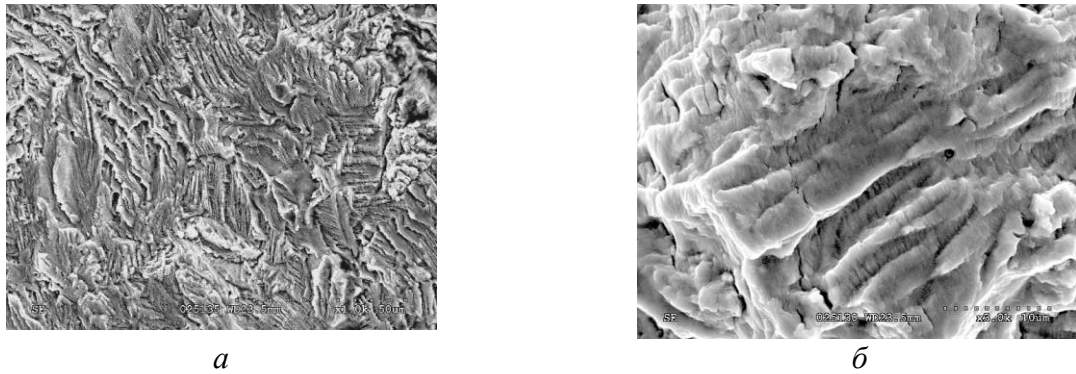


Рис. 2. Фрактографічні особливості росту втомної тріщини за швидкості  $\sim 5 \cdot 10^{-10}$  м/цикл (а) та  $\sim 2 \cdot 10^{-9}$  м/цикл (б) в сталі 15X1M1Φ у вихідному стані. Магістральний напрямок росту тріщини зліва на право.

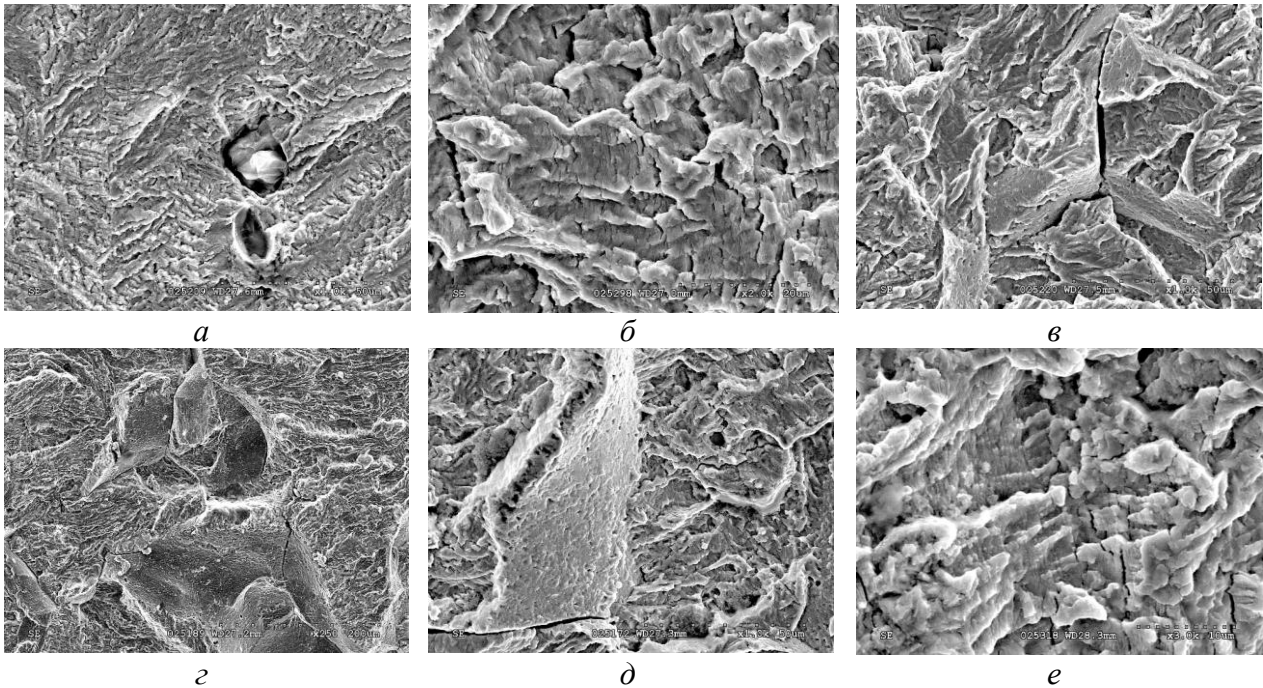


Рис. 3. Фрактографічні особливості росту втомної тріщини з швидкістю  $\sim 5 \cdot 10^{-10}$  м/цикл в сталі 15X1M1Φ після експлуатації на блоці з меншою (а, б, в,) і більшою (z, д, е) кількістю зупинок. Магістральний напрямок росту тріщини зліва на право.

Методи технічної діагностики стану металів і конструкцій останнім часом почали інтенсивно розвивати [10-12]. Зважаючи на інформативність і високу роздільну здатність фрактографічного аналізу, важливо розвинути його можливості і застосування для технічної діагностики елементів конструкцій та технічного стану експлуатованих матеріалів. Особливо важливо поєднати фрактографічні підходи з механічними та корозійно-механічними випробами, спрямованими на кількісне оцінювання поточного і граничного станів конструкційних сталей за комплексом механічних характеристик. При цьому є можливість порівняти особливості руйнування однаково експлуатованого металу в лабораторних (за контрольованих умов навантаження) та експлуатаційних (коли руйнування відбувається за впливу низки технологічних чинників) умовах. Для цього слід використати порівняльний аналіз фрактографічних ознак реальних зламів конструкційних елементів і лабораторних зразків та шукати відповідні ознаки руйнування і на цій основі встановлювати причини експлуатаційних пошкоджень. Разом з тим таке використання фрактографії дає основу лише для якісних оцінок, а для використання цього прецизійного методу в технічній діагностиці необхідно розробити систему виділення фрактографічних ознак і методичні підходи їх кількісного аналізу.

Фрактографічним аналізом якісно показано, що найголовнішою ознакою деградації металу були фасетки міжзеренного відколу на ділянці прпорогового росту втомної тріщини. Причому у випадку сталі з більшою кількістю зупинок їх було більше, ніж з меншою. Вважали, що ці фасетки

виникли ще на етапі експлуатації сталі завдяки виділенню вздовж меж зерен карбідів, які знизили їх когезивну міцність. Про це свідчив досить розвинений на мікрорівні рельєф на поверхнях міжзеренних фасеток у вигляді дрібних ямок, сумірних за розмірами з карбідами, які виявляли вздовж меж зерен у експлуатованому металі. Коли фронт втомної тріщини доходив до цих пошкоджених внаслідок деградації меж зерен, то тріщина миттєво поглинала розтріпані міжзеренні фрагменти, а її ріст при цьому пришвидшувався. Тому основною ознакою деградації вважали міжзеренні фрагменти зламів експлуатованого металу.

Кількісно оцінили площу фасеток міжзеренного відколу, що припадала на одиницю площі зламів зразків до різної міри деградованого металу за припорогової швидкості росту тріщини. Виявили, що в металі після більшої кількості зупинок технологічного процесу частка міжзеренного руйнування є вищою ніж в металі після їх меншої кількості (рис. 3). В не експлуатованій сталі таких дефектів практично не спостерігали (рис. 2).

Отже під час деградації сталі в експлуатаційних умовах в міру зростання кількості зупинок технологічного процесу по наростаючій утворюється що раз більше дефектів, сумірних з розмірами зерен. При цьому за видимого збереження цілісності металу суттєво знижують фактичний робочий переріз елемента конструкції та зростає концентрація напружень в максимально ослабленому його перерізі. Внаслідок цього механічний показник роботоздатності сталі  $\Delta K_{th\,eff}$ , який характеризує її опір утомному руйнуванню, стрімко знижується (рис. 4). Густину фасеток міжзеренного руйнування на фоні кризьзеренного втомного рельєфу, як визначальної фрактографічної ознаки деградації металу, вважали за характеристику міри пошкоженості деградованої сталі.

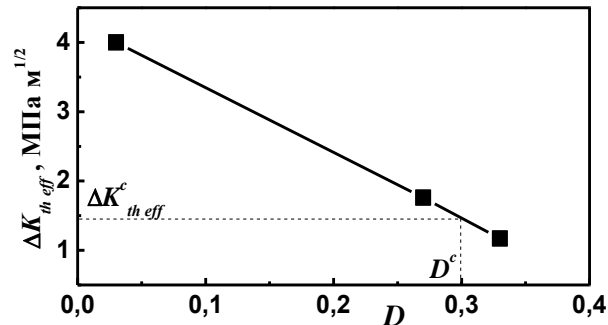


Рис. 4. Зв'язок частки міжзеренного руйнування  $D$  з ефективним пороговим рівнем циклічної тріщиностійкості  $\Delta K_{th\,eff}$  сталі 15X1M1Φ, експлуатованої на головних парогонях ТЕС впродовж  $\sim 2 \cdot 10^5$  год за різної кількості зупинок енергоблоків.

Таким чином попри те, що міра деградації сталей в значній мірі залежить від номінальної тривалості їх експлуатації  $\tau_{op}$ , прийшли до висновку, що за впливу наводнювального середовища (пара високих параметрів) стан деградованої сталі в значній мірі залежить ще і від кількості зупинок технологічного процесу. Адже в міру зростання їх кількості у наводнювальному середовищі технічний стан теплотривкової сталі однозначно знизився.

Отже, на деградацію металу впливає не лише тривалість експлуатації  $\tau_{op}$  в наводнювальному середовищі, а ще і кількість зупинок технологічного процесу. Результати кількісного оцінювання інформативної фрактографічної ознаки деградації (за площею міжзеренних пошкоджень  $D$ , що припадали на одиницю площі зламу з кризьзеренним втомним рельєфом, на припороговій ділянці втомного росту тріщини, що виникли внаслідок сумісного тривалого впливу робочих напружень, середовища та зупинок технологічного процесу під час експлуатації сталі на парогонях ТЕС, дали змогу побудувати кореляційну залежність між фрактографічним і механічним показниками технічного стану експлуатованої сталі (рис. 4) і описати її рівнянням прямої:

$$D = (\Delta K_{th\,eff} - A) / B \quad (1)$$

де  $A$  і  $B$  – сталі, які визначають точки перетину залежності  $\Delta K_{th\,eff} - D$  з осями абсцис і ординат.

Якщо взяти до уваги обґрунтування критичного рівня деградації за механічним показником роботоздатності  $\Delta K_{th\,eff}$  (зокрема, зроблене за результатами випроб металу, деградованого в контрольованих лабораторних умовах [5, 13], то можна встановити критичний рівень пошкоженості  $D^c$ , яка проявляється у вигляді міжзеренних фрагментів зламу, перевищення якого загрожує неконтрольованим руйнуванням елемента конструкції. Таким чином, на основі кількісного оцінювання інформативних фрактографічних ознак деградації металу на зламах можна за отриманою

прямолінійною залежністю  $\Delta K_{th\ eff} - D$  діагностувати технічний стан деградованого металу та оцінювати залишкову довговічність реальних елементів, які експлуатуються паралельно з пошкодженням (зокрема на інших вітках парогонів ТЕС). Для цього слід взяти до уваги встановлений раніше зв'язок між механічним показником стану експлуатованого металу ( $\Delta K_{th\ eff}$ ) та технологічним, який враховує номінальну тривалість експлуатації сталі на парогоні та кількість зупинок процесу під час неї [14].

**Висновки.** На основі порівняння фрактографічних ознак руйнування на ділянці припорогового росту втомної тріщини за випроб на циклічну тріщиностійкість сталі 15Х1М1Ф у вихідному стані та після 20 років експлуатації на парогоних ТЕС з різною кількістю (500 і 576) зупинок технологічного процесу виявили, що фасетки міжзеренного відколу на фоні класичного кризьеренного втомного рельєфу на припороговій ділянці втомного руйнування експлуатованої сталі можна прийняти за діагностичну ознаку її деградації. Частка такого міжзеренного руйнування може слугувати кількісною характеристикою для діагностування технічного стану сталі після її високотемпературної (540°C) експлуатації за впливу наводнювального технологічного середовища (пара під тиском до 24 МПа). Причому на зламах металу, який переніс більшу кількість зупинок, таких ознак деградації більше і вони рельєфніші. Отримали кореляційну залежність між часткою міжзеренного руйнування  $D$  та ефективним пороговим рівнем циклічної тріщиностійкості  $\Delta K_{th\ eff}$  для сталі, експлуатованої за однакової тривалості експлуатації, але різної кількості зупинок технологічного процесу, яку описали рівнянням прямої. Ця кореляційна залежність пропонується як шлях до оцінювання в першому наближенні технічного стану металу тих елементів парогонів, які експлуатуються паралельно з пошкодженням і для яких відомі кількість зупинок і тривалість експлуатації в технологічному процесі.

#### Список використаних джерел:

1. Majumdar S. Assessment of current understanding of mechanism of initiation, arrest and reinitiation of stress corrosion cracks in PWR steam generator tubing // NUREG/ CR-5752, ANL, Argonne, 2000. – 112 p.
2. Романів О.М., Зима Ю.В. Електронна фрактографія зміцнених сталей. – К.: Наук. думка, 1974. – 207 с.
3. Масштабные урны деформации и разрушения теплостойких сталей / Марущак П.О., Панин С.В., Студент А.З., Овечкин Б.Б. / Отв. ред. Пичугин В.Ф. – Томск: Из-во нац. исслед. Томского политехн. унив., 2013. – 236 с.
4. Кречковська Г. Оцінювання впливу експлуатації ТЕС в маневровому режимі на роботоздатність металу парогонів / Г. Кречковська, О. Студент // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів: ФМІ НАН України, 2009. – С. 947–952.
5. 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. – Т. 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 / Н. М. Nykyforchyn, О. Z. Student, Н. V. Krechkov's'ka and А. D. Markov // Materials Science. – 2010. – V. 46, № 2. – P. 177–189.
6. Кречковська Г. В. Оцінювання впливу тепловмісних у високотемпературному воденьвмісному середовищі на деградацію сталей парогонів ТЕС : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.01 "Матеріалознавство" / Г. В. Кречковська. – Львів, 2012. – 20 с.
7. Elber W. The significance of fatigue crack closure / Elber W – ASTM STP 486. – 1971. – P. 230–242.
8. Ritchie R. O. Some considerations on fatigue crack closure at near-threshold stress intensities due to fracture surface morphology / R. O. Ritchie, S. Suresh // Metal. Trans. – 1982. – V. 13, № 5. – P. 937–940.
9. Suresh S. Oxide-induced crack closure: an explanation for near threshold corrosion fatigue crack growth behavior / S. Suresh, G. F. Zamiski, R. O. Ritchie // Metal. Trans. – 1981. – V. 12, № 8. – P. 1435–1443.
10. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під загальною ред. В.В. Панасюка. Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика – Київ: Наук. думка, 1998. – 1134 с.
11. Назарчук З. Т. Діагностика матеріалів і середовищ / З. Т. Назарчук // Фізико-механічний інститут (До 60-річчя з часу заснування) / Під ред. В.В.Панасюка. – Львів : СПОЛОМ, 2011. – 2011. – 324 с.
12. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій. Довідниковий посібник Т. 1: Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів / Є.І. Крижанівський, О.П. Остап, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, П.В. Ясній / Під заг. ред. З.Т. Назарчука. - Львів: Простір-М, 2016. – 360 с.
13. An accelerated method of hydrogen degradation of structural steels by thermocycling / О.З. Student // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – 34, №4. – С. 45-52. (Accelerated method for hydrogen degradation of structural steel / О.З. Student // Materials Science. – 1998. – 34, 4. – P. 497-507.)
14. СОУ 40.3-0013044-20:2010. Настанова. Оцінювання технічного стану металу прямих ділянок головних парогонів ТЕС. Вплив зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану експлуатованого металу. Типова інструкція. / Кушнір О.В., Харандюк Т.М., Сервіка Я.В., Панасюк В.В., Никифорчин Г.М., Студент О.З., Кречковська Г.В., Марков А.Д., Цирульник О.Т., Свірська Л.М., Онищак Я.Д., Костюк І.Ф. – Львів: ДП «ЛКБ» і ФМІ НАНУ, 2010. – 52 с.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017