

Г.В. Кречковська^{1,2}, М.Я. Головчук¹, А.Є. Лісничук¹, О.З. Студент¹
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів
Національний університет «Львівська політехніка»

ВИЗУАЛІЗАЦІЯ ФРАКТОГРАФІЧНИХ ОЗНАК ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОТРИВКОЇ СТАЛІ

Проаналізовано злами зразків після випробувань на ударну в'язкість, статичну та циклічну тріщиностійкість тривало експлуатованої ($\sim 2 \cdot 10^5$ год) теплостійкої сталі 15X1M1Ф. Фрактографічним аналізом зламів виявлено відмінності між станом металу, що під час експлуатації переніс різну кількість зупинок блоків (501 та 576). А саме в металі з більшою кількістю зупинок частка міжзеренних фрагментів на фоні типового крізьзеренного рельєфу в зоні спонтанного руйнування зразків випробуваних на ударну в'язкість та статичну тріщиностійкість була високою, що пов'язано з його інтенсивнішою деградацією. Крім того, після випробувань на удар частка міжзеренних фасеток була більшою ніж за випроб на статичну тріщиностійкість, що пов'язано з більшим відхиленням тріщини (навіть на декілька зерен) від магістрального напрямку її поширення. Тоді як при статичних випробуваннях руйнування відбувалося лише по тих ослаблених деградацією меж зерен, які траплялися на шляху фронту магістральної тріщини. При циклічних випробуваннях на припороговій ділянці росту тріщини на зламах експлуатованої сталі на фоні класичного крізьзеренного втомного руйнування, виявили фрагменти міжзеренного руйнування, які пов'язали з межами зерен пошкодженими внаслідок повзучості, які утворилися під час тривалої експлуатації. Отримані результати дають підстави рекомендувати площу міжзеренного рельєфу, що припадає на одиницю площі зламів зразків з експлуатованої теплотривкої сталі, для кількісного оцінювання її структурно-механічного стану.

Ключові слова: парогони, теплотривка сталь, фрактографічний аналіз, міжзеренне руйнування, деградація.

Г. В. Кречковская, М. Я. Головчук, А. Е. Лисничук, О. З. Студент ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ТЕПЛОСТОЙКОЙ СТАЛИ

Проанализированы изломы образцов после испытаний на ударную вязкость, статическую и циклическую трещиностойкость длительно эксплуатированной ($\sim 2 \cdot 10^5$ ч) теплостойкой стали 15X1M1Ф. Фрактографическим анализом изломов выявлены различия между состоянием металла, который при эксплуатации перенес разное количество остановок блоков (501 и 576). А именно в металле с большим количеством остановок доля межзеренных фрагментов на фоне типичного трансзеренного рельефа в зоне спонтанного разрушения образцов, испытанных на ударную вязкость и статическую трещиностойкость была высокой, что связано с его более интенсивной деградацией. Кроме того, после испытаний на удар доля межзеренных фасеток была больше чем при испытаниях на статическую трещиностойкость, что связано с большим отклонением трещины (даже на несколько зерен) от магістрального направления ее распространения. Тогда как при статических испытаниях разрушение происходило только по тем ослабленным деградацией границам зерен, которые встречались на пути фронта магістральной трещины. При циклических испытаниях на припороговом участке роста трещины на изломах эксплуатируемой стали на фоне классического трансзеренного усталостного разрушения, обнаружили фрагменты межзеренного разрушения, которые связали с границами зерен, поврежденными вследствие ползучести, образованными во время длительной эксплуатации. Полученные результаты дают основания рекомендовать площадь межзеренного рельефа, приходящуюся на единицу площади изломов образцов с эксплуатированной теплоустойчивой стали, для количественной оценки ее структурно-механического состояния.

Ключевые слова: паропроводы, теплоустойчивая сталь, фрактографический анализ, межзеренное разрушение, деградация.

H. Krechkovska, M. Golovchuk, A. Lisnichuk, O. Студент
VISUALIZATION OF FRACTOGRAPHIC SIGNS OF OPERATIONAL DEGRADATION OF
HEAT-RESISTANT STEEL

Fracture surfaces of specimens after testing for impact toughness, fracture toughness and fatigue crack growth resistance of heat-resistant of 15Kh1M1F steel for a long time ($\sim 2 \cdot 10^5$ h) are analyzed. Fractographic analysis of fracture surfaces revealed differences between the state of the metal, which during operation suffered a different number of block shut-downs (501 and 576). Namely, in a metal with a large number of shut-downs, the fraction of intergranular fragments against the background of a typical transgranular relief in the zone of spontaneous fracture of specimens tested for impact toughness and fracture toughness was high, which is associated with its more intense degradation. In addition, after impact toughness tests, the fraction of intergranular facets was greater than in tests for fracture toughness, which is associated with a large deviation of the crack (even by several grains) from the main direction of its propagation due to the bigger dimension of plastic zone in the tip of stress concentrator than in the crack tip. Whereas in the fracture toughness tests, destruction occurred only along those grain boundaries weakened by degradation that were encountered along the path of the main crack front. During fatigue crack growth resistance tests (in the near-threshold section of crack growth) on the fracture surfaces of exploited steel against the background of classical transgranular fatigue fracture, fragments of intergranular fracture were found, which were associated with grain boundaries damaged due to creep during long-term operation. The obtained results give grounds to recommend the area of intergranular relief per unit area of fracture surfaces of specimens from exploited heat-resistant steel, for a quantitative assessment of its structural and mechanical state.

Key words: steam lines, heat-resistant steel, fractographic analysis, intergranular fracture, degradation.

Постановка проблеми. До важливих чинників впливу на структурно-фазовий стан теплотривких сталей, їх механічні властивості за повзучості [1 – 3], міцності та пластичності за розтягу [4 – 5] та удару [6], тріщиностійкості за статичних і циклічних навантажень [7 – 9] відносять тривалу дію високої температури, корозійно-наводнювального робочого середовища та різних комбінацій циклічних та статичних навантажень. Сумісний вплив цих чинників спричиняє критичну кількість пошкоджень в елементах конструкцій та їх руйнування. Зупинки технологічного процесу теж відносять до істотних чинників впливу на зміну стану сталей [10]. Адже додаткові термічні напруження, які залежать від швидкості нагрівання (чи охолодження) елементів конструкцій, сприяють їх практично бездеформаційному (крихкому) руйнуванню [11].

Останнім часом фрактографічний аналіз, який широко використовують для з'ясування причин руйнування конструкцій, все частіше залучають до оцінювання реального технічного стану експлуатованих сталей [12, 13]. Макро- та мікроособливості руйнування, які виявлено як на реальних зламах, отриманих в технологічних умовах експлуатації об'єкта та на зламах зразків після випробувань в лабораторних умовах, дають змогу з'ясувати інтенсивність пошкоджуваності і в такий спосіб судити про поточний стан об'єктів та встановити фрактографічні ознаки, що найяскравіше відображають зміни в металі під час тривалої експлуатації.

Мета дослідження – проаналізувати злами зразків після випробувань на ударну в'язкість, статичну та циклічну тріщиностійкість сталі 15X1M1Ф, експлуатованої на парогонях ТЕС та виявити фрактографічні ознаки її експлуатаційної деградації.

Об'єкт досліджень. Аналізували теплотривку сталь 15X1M1Ф (0,14% С; 1,3 Cr; 1,0 Мо; 0,75 Mn; 0,1 Ni; 0,3 Si; 0,25 V; 0,012 S; 0,027% P) у стані постачання та після експлуатації на головних парогонях ТЕС впродовж $\sim 2 \cdot 10^5$ год при температурі до 545°C і тиску до 24 МПа. За однакової тривалості експлуатації метал з різних блоків (№ 1 і 2) експлуатувався за різної кількості зупинок технологічного процесу, а саме кількість зупинок першого блоку $N_1 = 501$, а другого – $N_2 = 576$.

Технічний стан металу оцінювали за ударною в'язкістю, визначеною згідно вимог ГОСТ 9454-78 [14]. Для цього випробовували типові балкові зразки Шарпі 10×10 мм радіус V-подібного надрізу в яких становив 0,25 мм. Для випроб на тріщиностійкість сталей використали балкові зразки (10×20×160 мм) з крайовим надрізом. Статичну тріщиностійкість K_c визначали за випроб триточковим згином, а циклічну тріщиностійкість – консольним згином частотою 10 Гц з побудовою кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) у номінальних і ефективних координатах. Визначали номінальні ΔK_{th} та ефективні $\Delta K_{th\,eff}$ (з урахуванням закриття тріщини (ЗТ)

порогові розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), а ефект ЗТ оцінювали методом податливості [7].

Викладення основного матеріалу. В працях [10, 15, 16] показано, що найчутливішими до експлуатаційної деградації теплотривких сталей виявилися їх ударна в'язкість, статична та циклічна тріщиностійкість. Особливістю високотемпературної (до 540°C) деградації теплотривких сталей є зміни в їх структурі. Завдяки дифузії елементи легування та вуглець перерозподіляються і виділяються у вигляді складнолегованих карбідів вздовж меж зерен, які ослаблюють міжзеренні зв'язки. Збільшення розмірів зерен та карбідів в структурі сталі сприяють зниженню їх ударної в'язкості, і вони стають схильними до розтріскування [17, 18]. Базуючись на результатах механічних випробувань та структурному аналізі теплотривкої сталі важливо проаналізувати злами лабораторних зразків для візуалізації фрактографічних особливостей деградації сталей.

Ознаки деградації сталі на зламах зразків на ударну в'язкість. Проаналізували злами зразків, випробуваних на удар. На ділянці в'язкого ямкового рельєфу (в околі концентратора напружень) ознак ослаблення когезії між суміжними зернами не спостерігали. Зменшилась лише ширина ділянки в'язкого рельєфу на зламах зразків, вирізаних з металу після більшої кількості зупинок процесу. Це ознака нижчих затрат енергії на їх руйнування через сильнішу деградацію.

Лише на етапі неконтрольованого руйнування ударних зразків вдалося візуалізувати зниження когезії суміжних зерен за складніших умов експлуатації (рис. 1). Порівнявши фрактограми ударних зразків із сталі 15X1M1Ф, тривало (~2·10⁵ год) експлуатованої на головному парогоні ТЕС за різної кількості зупинок блоків, виявили ознаки зниження когезії суміжних зерен. Так, в міру зростання кількості таких зупинок однозначно зростала кількість фасеток міжзеренного відколу, які рельєфно виділялися на фоні ділянок кризьзеренного відколу, характерного для зламів зразків на удар. Як наслідок, за максимальної кількості зупинок блоків в зоні доламу ударних зразків переважало міжзеренне руйнування (рис. 1 а, б).

Слід відзначити, що не всі міжзеренні фасетки, виявлені на зламах ударних зразків, слід відносити до пошкоджень внаслідок повзучості впродовж тривалої експлуатації сталі на парогоні. Але вони однозначно свідчать про зменшення зв'язку між зернами, спричиненого деградацією структури сталі під час експлуатації. Тому площу міжзеренних фасеток на одиничній площі зламів зразків, випробуваних на ударну в'язкість, використали для кількісної оцінки фактичного структурно-механічного стану сталі, експлуатованої з різною кількістю зупинок блоків. Причому йдеться саме про критичний стан металу, оскільки аналізували ділянки неконтрольованого руйнування зразків (зони їх доламу).

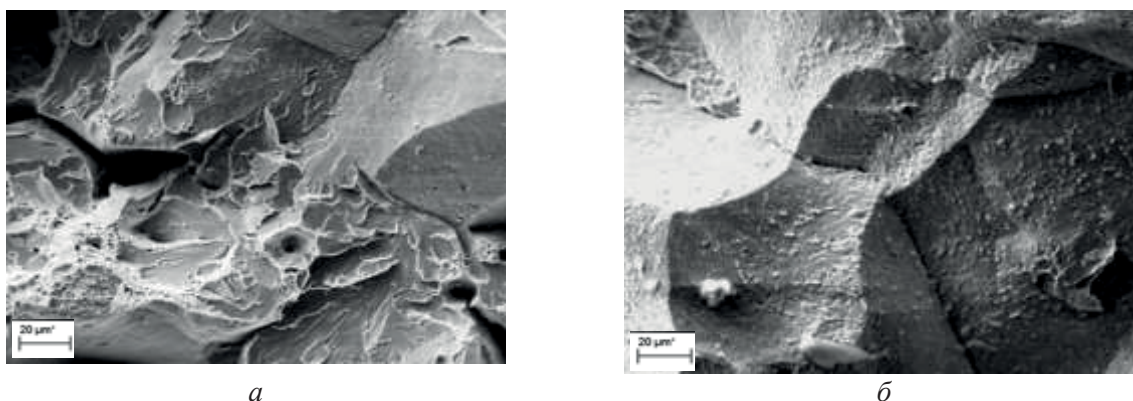


Рис. 1. Фрактографічні свідчення ослаблення зв'язку між зернами в сталі 15X1M1Ф, деградованій за дії 501 (а) та 576 (б) зупинок технологічного процесу, що проявилися на ділянці спонтанного руйнування на зламах ударних зразків міжзеренними фрагментами.

Використавши запропонований показник, вдалося показати нерівномірність розподілу експлуатаційних зерномежевих пошкоджень в структурі сталі поперек стінки труби. В середині стінки труб процес передислокації карбідів на межі зерен виявилася найменш інтенсивним і, відповідно, пор навколо них утворилося теж найменше. Оскільки, саме ці пори визначають міцність зв'язків між суміжними зернами, то значення показника зерномежевої пошкоженості виявилися значно меншими в центрі перерізу стінки труби ніж біля обох поверхонь труб (рис. 2). Причому чим інтенсивніше деградований метал (після більшої кількості зупинок блоків в процесі

експлуатації), тим відчутнішим виявився перепад по товщині стінки труби за цією структурною ознакою, пов'язаною з ослабленням меж між суміжними зернами.

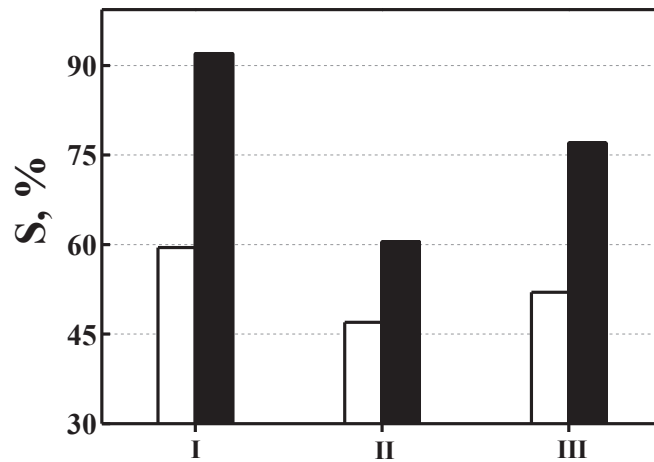


Рис. 2. Частка S зерномежевих фрагментів, що припадали на одиничну площу зламу на зразках на ударну в'язкість, вирізаних поблизу зовнішньої (позначення I), внутрішньої (III) поверхонь та всередині стінки (II) труб із сталі 15X1M1Ф, експлуатованих на парогонях ТЕС впродовж $\sim 2 \cdot 10^5$ год із 501 (білі) та 576 (чорні стовпчики) зупинками технологічного процесу.

Фрактографічні ознаки експлуатаційної деградації сталі за зламами зразків, випробуваних на тріщиностійкість за статичного навантаження. Аналіз зламів зразків на статичну тріщиностійкість з експлуатованої на парогонях сталі 15X1M1Ф виявив також ослаблення зв'язку між суміжними зернами. За випроб на ударну в'язкість виявили, що біля зовнішньої поверхні труби частка міжзеренних фасеток є найбільшою, порівняно з її внутрішньою поверхнею та центральною частиною перерізу труби. Тому в подальшому аналізували частку міжзеренних фасеток на зламах зразків, вирізаних саме біля зовнішньої поверхні труби.

На основі проведеного аналізу підтвердили висновок, до якого прийшли з аналізу зламів зразків на ударну в'язкість. А саме, що на етапі неконтрольованого руйнування зразків із сталі 15X1M1Ф після більшої кількості зупинок технологічного процесу, істотно зросла кількість міжзеренних фасеток, які виділялися на фоні плиткого рельєфу з кризьеренних відколів (рис. 3). Кількісна оцінка площі зламу зразка на статичну тріщиностійкість, що відповідала міжзеренним фрагментам, показала, що максимальна їх частка на одиничній площі зламу S виявилася на зламі зразка із сталі після 576 зупинок блоків (рис. 3в).

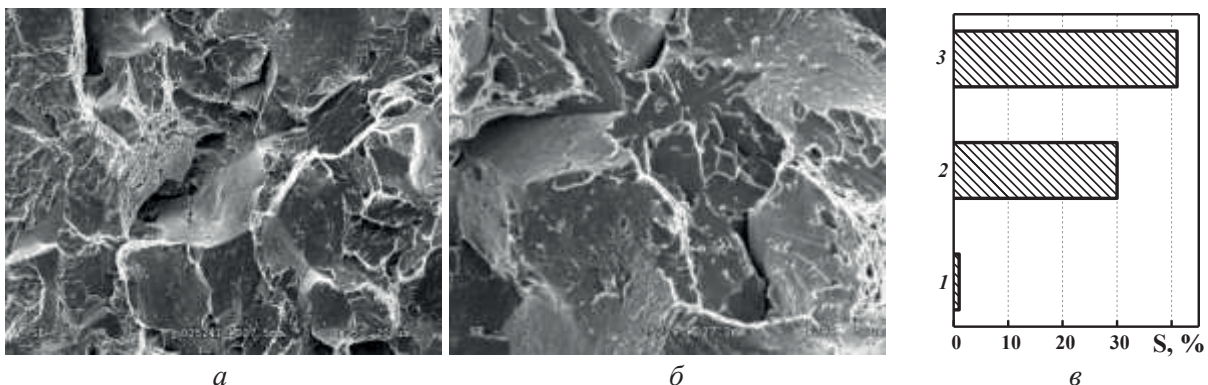


Рис. 3. Фрактографічні докази ослаблення зв'язку між зернами в сталі 15X1M1Ф після $\sim 2 \cdot 10^5$ год експлуатації на парогоні ТЕС із 501 (а) і 576 (б) зупинками процесу, та частка площі міжзеренних фрагментів (в) на зламах зразків на статичну тріщиностійкість із сталі 15X1M1Ф у вихідному стані (I) після $\sim 2 \cdot 10^5$ год її експлуатації з 501 (2) і 576 (3) зупинками.

Водночас зауважили, що чутливість запропонованого фрактографічного показника до зміни фактичного структурно стану експлуатованої сталі, виявилася нижчою, ніж за результатами його оцінок на зламах зразків на ударну в'язкість. Адже, згідно ударних випроб злами сталі,

експлуатованої за більшої кількості теплосмін через зупинки процесу, майже повністю покриті фасетами крихкого міжзеренного відколу. Виявлену різницю за чутливістю до ослаблення зв'язку між зернами пояснили різним розміром зони передруйнування на зразках з V-подібним надрізом (ударна в'язкість) та гострою втомною тріщиною (статична тріщиностійкість). Оскільки зона передруйнування охоплює значно меншу кількість зерен під час випроб зразків на статичну тріщиностійкість, то, зрозуміло, що до цієї зони потрапляє менша кількість меж зерен, ослаблених тривалою деградацією сталі у технологічному процесі. Тоді як у значно більшій зоні процесу у вершині надрізу зразків на удар потрапляє більше зерен і завдяки цьому виявляється зниження когезії між конгломератами зерен, межі яких були пошкоджені під час експлуатації.

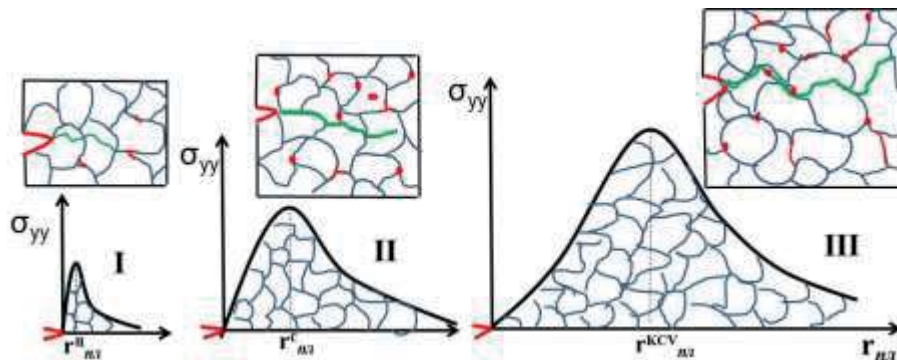


Рис. 4. Схеми зеренної структури та розподілу напружень в зонах передруйнування зразків, випробовуваних на циклічну (I), статичну (II) тріщиностійкість та на ударну в'язкість (III), яка ілюструє різну чутливість до деградації запропонованого фрактографічного показника.

Схема зон передруйнування дає наочне уявлення про характер розподілу напружень у вершинах V-подібного надрізу і втомної тріщини та про розміри цих зон, де метал пластично деформується під час випробувань за різними схемами (рис. 4). Очевидно, що на стадії неконтрольованого руйнування зразків на статичну тріщиностійкість міжзеренні фрагменти на зламах траплятимуться лише вздовж тих меж зерен, які попри те, що ослаблені під час експлуатаційної деградації, опинялися безпосередньо попереду фронту головної тріщини [15]. Водночас за випроб на ударну в'язкість траєкторія тріщини може відхилитися від магістрального напрямку поширення на понад декілька зерен. Завдяки цьому на зламах зразків на статичну тріщиностійкість виявили загалом менше фасеток з міжзеренним рельєфом, ніж на зламах зразків на ударну в'язкість.

Отже, оскільки злами зразків на ударну в'язкість забезпечують найвищу чутливість фрактографічних оцінювання кількості зерен з ослабленою когезією, спричиненою процесами повзучості і структурними перетвореннями під час експлуатації, то саме цей тип механічних випробувань рекомендується для використання під час оцінювання міри деградації сталі.

Аналіз фрактографічних ознак деградації сталі за зламами зразків на циклічну тріщиностійкість. У цьому випадку для оцінки стану тривало експлуатованої сталі теж скористалися підходами механіки руйнування, а саме застосували порогові показники циклічної тріщиностійкості (ЦТ), висока чутливість яких до зміни структурно-механічного стану експлуатованих сталей вже неодноразово демонструвалася [19]. Висока локальність зони процесу за коефіцієнта інтенсивності напружень, який відповідає ефективному порогу ЦТ, віддзеркалює структурні зміни в сталі під час її експлуатації на субструктурному рівні [20]. Це дає змогу оцінювати рівень експлуатаційної пошкодженості сталі не лише на рівні зерен, але і на рівні субзерен.

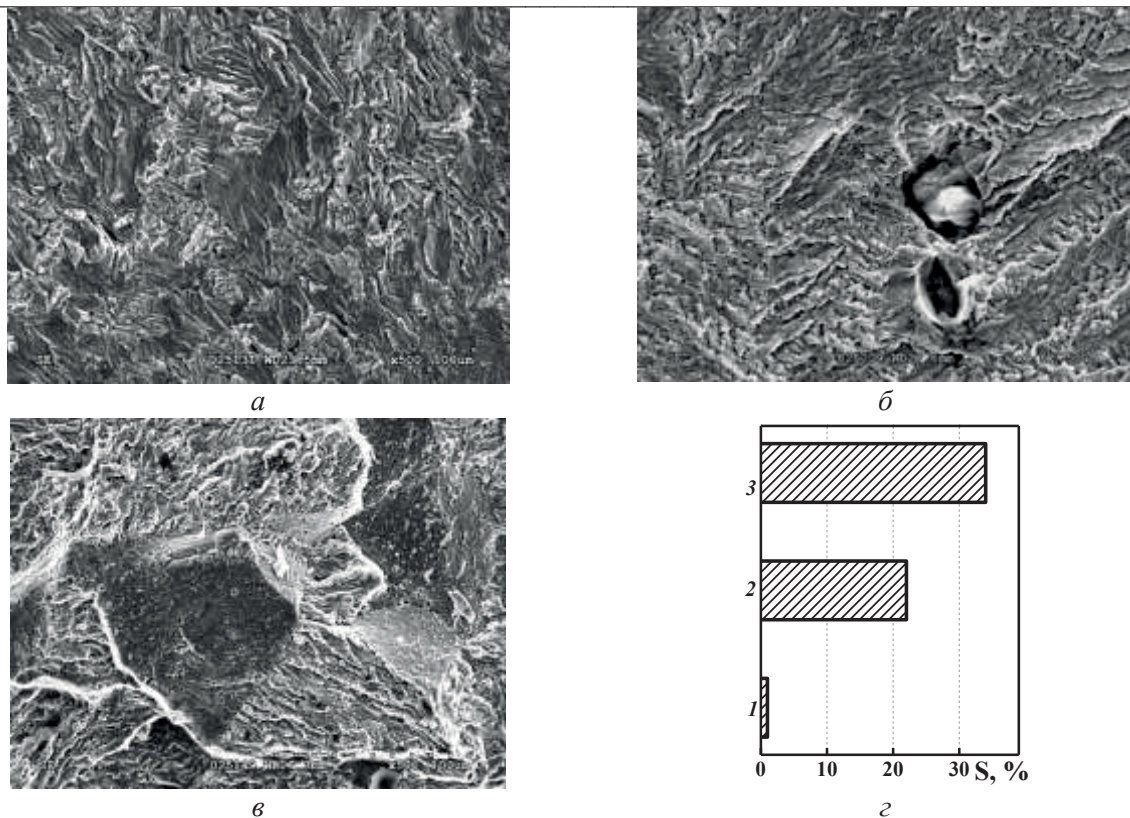


Рис. 5 Типові фрактограми зразків, випробуваних на циклічну тріщиностійкість, отримані в зоні припорогової швидкості росту втомної тріщини в сталі 15X1M1Ф перед (а) та після (б, в) експлуатації впродовж $\sim 2 \cdot 10^5$ год на парогонях ТЕС із 501 (б) і 576 (в) зупинками технологічного процесу та частка міжзеренного руйнування (г) на зламах зразків у вихідному стані (1) та після експлуатації з 501 (2) і 576 (3) зупинками.

Щоб виділити зерна, пошкоджені внаслідок високотемпературної повзучості, що неминуче супроводжує експлуатацію сталі 15X1M1Ф на головних парогонях ТЕС, скористалися зміною механізму руйнування, властивого за статичного навантаження під час повзучості та традиційно реалізованого за циклічних навантажень. З цією метою порівняли злами сталі у вихідному стані та після високотемпературної експлуатації на ділянці припорогового росту тріщини за випроб на ЦТ у повітрі. Адже зразки з неексплуатованих теплотривких сталей внаслідок дії циклічних навантажень звикло руйнуються за крізьзеренним механізмом з утворенням фестонів і втомних борідок. Для припорогового росту тріщини характерні крім того псевдо борідки зі зміною орієнтації при переході від зерна до зерна (рис. 5а). Разом з тим в експлуатованій сталі додатково з'явилися випуклі елементи міжзеренного рельєфу, які виділялися на фоні загалом плиткого втомного рельєфу сталі у вихідному стані (рис. 5). Їх появу пояснили тим, що завдяки структурним перетворенням за тривалої повзучості в експлуатованій сталі ще до випроб на ЦТ певна частина меж зерен вже пошкоджена. Під дією циклічних навантажень за припорогової швидкості росту тріщини такі ушкоджені межі зерен легко розкривалися і в такий спосіб через морфологічну різницю між- і крізьзеренним руйнуванням стало можливим виокремити на зламах зразків деградованої сталі ушкоджені під час експлуатації межі зерен. Рельєфні міжзеренні фасетки чітко візуалізувалися на фоні низькорельєфних крізьзеренних елементів зламу експлуатованої сталі. Зокрема, частка фрагментів міжзеренного рельєфу біля зовнішньої поверхні труби (де вплив повзучості найбільший) досягла $\sim 34\%$ в сталі, що перенесла більшу кількість зупинок процесу під час експлуатації. Водночас на сталі з 501 зупинкою - міжзеренних елементів в зоні припорогового росту тріщини виявили лише $\sim 22\%$ (рис. 5г).

Отже, внаслідок експлуатації сталі 15X1M1Ф впродовж $\sim 2 \cdot 10^5$ год на головних парогонях ТЕС площа міжзеренних фрагментів на зламах зразків була більшою в металі, експлуатованому за більшої кількості зупинок технологічного процесу (рис. 5в), і меншою - за меншої їх кількості (рис. 5б). Це вважали ознакою сильнішої деградації сталі під час експлуатації за більшої кількості зупинок блоків. Тому частку площі з міжзеренними фасетками на зламі одиничної площі прийняли

за фрактографічну характеристику експлуатаційної деградації низьколегованих сталей парогонів ТЕС, зумовлену появою в них зерномежевих пошкоджень (рис. 5г).

За результатами проведених досліджень сталі 15X1M1Ф прийшли до розуміння, що високотемпературна повзучість змінює її структуру, сприяє виділенню та коагуляції складно легованих карбідів на межах зерен, їх відокремленню від феритної матриці та утворенню мікропорожнин навколо них з наступним витягуванням перетинок між ними аж до формування пошкоджень, сумірних з розмірами зерен. Саме цей механізм експлуатаційної деградації сталі на мікроструктурному рівні підтвердили на основі фрактографічних досліджень зламів зразків, отриманих після їх випроб на ударну в'язкість, статичну тріщиностійкість та ЦТ, виявивши на них випуклі міжзеренні фасетки на фоні плиткового втомного зламу. Причому фрагменти міжзеренного рельєфу прийняли за визначальну ознаку деградації структури теплотривких сталей. Цю ознаку вдалося візуалізувати на зламах усіх зразків (незалежно від виду механічних випроб). Їх вважали 3-D відбитками експлуатаційної пошкоженості структури деградованої сталі. Усі варіанти сталі руйнувалися за траєкторією з найменшим опором із, як правило, критичною кількістю ослаблених меж зерен або навіть з готовими зерномежевими пошкодженнями, що сформувалися впродовж експлуатації сталі головних парогонів ТЕС із складними температурними і силовими умовами, що сприяють повзучості. Тому встановлені закономірності трансформації фрактографічного рельєфу залежно від міри деградації сталі важливі для кількісної оцінки її структурно-механічного стану.

Висновки. Металографічним і фрактографічним аналізом встановлено, що структурні зміни в теплотривкій сталі 15X1M1Ф, спричинені повзучістю і зумовлені виділенням та коагуляцією карбідів на межах зерен, їх поступовим відокремленням від матриці з формуванням порожнин навколо них та витягуванням перетинок між ними аж до їх остаточного руйнування з формуванням зерномежових тріщин. На зламах зразків після випробувань на удар, статичну та циклічну тріщиностійкість ці структурні зміни візуалізуються у вигляді міжзеренних фрагментів. Причому за випробувань на статичну тріщиностійкість та ударну в'язкість міжзеренні фасетки на фоні класичного крізьзеренного втомного руйнування виявляли на етапі спонтанного поширення руйнування вздовж ослаблених деградацією меж зерен, а за випробувань на циклічну тріщиностійкість – на припороговій ділянці росту втомної тріщини на зламах. Виявили, що за випробувань на циклічну тріщиностійкість фрагменти міжзеренного руйнування пов'язані з межами зерен, пошкодженими внаслідок повзучості під час тривалої експлуатації, а за випробувань на удар та статичну тріщиностійкість виявлені міжзеренні фрагменти пов'язали крім того зі зниженням когезії між суміжними зернами в структурі сталі, спричиненим її експлуатаційною деградацією. Отримані результати дають підстави рекомендувати площу міжзеренного рельєфу, що припадає на одиницю площі зламів зразків з експлуатованої теплотривкої сталі, як кількісний показник її структурно-механічного стану.

Список використаних джерел:

1. Бабій Л. О., Студент О. З., Загурський А., Марков А. Д. Повзучість у водні експлуатованої сталі 2,25Cr–Mo. Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2007. Т. 46. № 5. С. 91–96.
2. Student O. Z., Matysiak H., Zagórski A., Babij L. O., Kurzydłowski K. J. Creep rupture strength in hydrogen of Cr-Mo-V steel. Inżynieria powierzchni. 2005. 1, 2A. P. 175–179.
3. Zagórski A., Student O., Babij L., Nykyforchyn H., Kurzydłowski K. J. Peculiarities of hydrogen effect on the creep process in the Cr-Ni-Mo steel Advances in Materials Science. 2007. 7, 1(11). P. 211–218.
4. Дзіоба І. Р. Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах. Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2010. Т. 46. № 3. С. 65–72.
5. Свірська Л., Студент О., Никифорчин Г. Закономірності зміни механічних характеристик сталі 12Х1МФ з різних зон гину парогону ТЕС. Вісник Тернопільського нац. техн. університету. 2013. №4 (72), 4. С. 179–187.
6. Марущак П. О., Бишак Р. Т., Глиха В., Сорочак А. П. Влияние температуры на ударную вязкость и динамическую трещиностойкость стали 25Х1М1Ф. Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2010. Т. 46, № 4. С. 112–117.
7. Романів О. М., Никифорчин Г. М., Студент О. З., Дзіоба І. Р., Лонюк Б.П. Вплив експлуатаційної пошкоженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості. Фіз.-хім. механіка матеріалів. 1998. Т. 34, № 1. С. 101–104.
8. Студент О. З. Особливості впливу водню на порогові характеристики циклічної тріщиностійкості конструкційних сталей. Машинознавство. 1999. Т. 35, № 2. С. 17–23.

9. Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д. Поріг циклічної тріщиностійкості як показник високотемпературної водневої деградації низьколегованих сталей енергетичного обладнання. Механічна втома металів: праці колокв. Тернопіль: ТДТУ, 2006. С. 78–84.
10. Никифорчин Г. М., Студент О. З., Кречковська Г. В., Марков А. Д. Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС. Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2010. Т. 46, № 2. С. 42–54.
11. Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смян О. Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления / отв. ред. Василенко И. И. К.: Наук. думка, 1990. 272 с.
12. Марущак П., Данилишин Г., Окіпний І., Сорочак А. Фрактодіагностика множинних експлуатаційних та технологічних тріщиноподібних дефектів. Машинознавство. 2011. № 3–4. С.40 – 44.
13. Student O., Krechkovs'ka H. Visualization of damages of the main pipelines using cyclic hydrotesting. *Procedia Structural Integrity*. 2016. V.2. P. 549–556.
14. ГОСТ 9454–78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Москва: Издательство стандартов. 2008. 12 с.
15. Студент О., Кречковська Г., Бабій Л. Вплив теплосмін під час експлуатації парогонів ТЕС на статичну тріщиностійкість сталі 15Х1М1Ф. Вісник Тернопільського нац. техн. університету. 2013. № 4(72). С. 199–206.
16. Кречковська Г., Свірська Л., Студент О. Інтенсифікація деградації теплотривких сталей гинів парогонів ТЕС під впливом теплосмін внаслідок зупинок технологічного процесу. Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкції: зб. наук. пр. 5-ї Міжнар. конф., м. Львів, 24-27 червня 2014 р. Л. 2014. С. 717–724.
17. Дзіоба І. Р. Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2010. Т. 46. № 3. С. 65–72.
18. Балицький О. І., Ріпей І. В., Онищак Я. Д. Зміна ударної в'язкості сталі 12Х1МФ під час експлуатації парогонів ТЕС. Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2009. Т. 45, №6. С. 65–69.
19. Студент О. З., Лонюк Б. П. Методика швидкісного високотемпературного старіння сталей. Фіз.-хім. механіка матеріалів. 1997. № 6. С. 111–112.
20. Романив О. Н., Никифорчин Г. Н., Андрусив Б. Н. Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов. Физ.-хим. механика материалов. 1983. №3. С. 47 – 61.

Рецензенти статті:

- 1) Кулик В. В., доцент кафедри Матеріалознавства та інженерії матеріалів Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., доц.
- 2) Греділь М. І., стар. наук. співр. відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, к.т.н.