

ФРАКТОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ 2,25Cr-1Mo ПІСЛЯ ВИПРОБ НА ПОВЗУЧІСТЬ

Г. В. Кречковська, Л. О. Бабій, О. З. Студент

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

The fractography features of fracture of the creep tested 2,25Cr-1Mo steel in the initial state and after the operation during $6 \cdot 10^4$ hours in the process of oil hydrocracking process were analyzed. It was found the creep fracture occurs for the classic ductile mechanism by the way of nucleation, growth and association of pores. Special fractographic feature of degraded steel is large and deep holes caused by decohesion nonmetallic inclusions from the matrix. The next feature is the big and plate disc-shaped dimples with the small micropores around carbides on their bottom. Both types of holes were grown under the influence of hydrogen accumulated by bulk metal during operation.

Однією з причин втрати роботоздатності нафтопереробного устаткування є нестабільність властивостей корпусних сталей в часі тривалої експлуатації. Серед основних чинників їх деградації є високі експлуатаційні температура, напруження та наводнювальне технологічне середовище [1, 2]. Чинні регламенти експлуатації реакторів передбачають контроль за деформацією внаслідок повзучості, корозійними ураженнями, проявами водневої корозії тощо. Для того щоб прогнозувати і уникати руйнувань, спричинених повзучістю, використовують результати лабораторних випроб на тривалу міцність [3], які екстраполюють на бажану тривалість експлуатації устаткування [4]. Для з'ясування причин деградації характеристик повзучості і тривалої міцності металу, експлуатованого в реальному технологічному процесі, використано фрактографічний аналіз зламів лабораторних зразків, який дає можливість прогнозувати закономірності накопичення розсіяної пошкодженості корпусної сталі в часі експлуатації та впливу на цей процес водню як робочого середовища.

Об'єкт досліджень та використані методики. Дослідили типову для виготовлення корпусів реакторів гідрокрекінгу нафти сталь типу 2,25Cr-1Mo у вихідному стані та після експлуатації в технологічному процесі гідрокрекінгу нафти впродовж $6 \cdot 10^4$ год у вигляді зразків свідків (розміри: довжина – 135, висота – 40, ширина – 30 мм). Умови деградації металу зразків свідків і корпусу реактора відрізняло те, що зразки свідки не були під навантаженням, тоді як у стінці корпусу реактора під час його експлуатації виникають істотні напруження розтягу. Отже, вплив робочих напружень на деградацію сталі в дослідженнях не враховано. Для фрактографічних досліджень використали злами плоских зразків перерізом 3×20 мм, попередньо випробуваних на тривалу міцність у повітрі та у водні під тиском 0,3 МПа за робочої для реакторів гідрокрекінгу нафти температури 450 °С. Фрактографічні особливості руйнування під час випроб на повзучість досліджували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

Основні результати дослідження. Випробувані на повітрі зразки сталі у вихідному стані руйнувалися на макрорівні внаслідок зсуву. В результаті площини макрозсуву, які в центральній частині перерізу зразка перетиналися, утворюючи чіткий гребінь, формували злами. За випроб у водні макрозсув спостерігали лише поблизу бічних поверхонь зразків, а в центральній частині зламів переважала нормальна орієнтація їх поверхні. Вже на макрорівні зауважено таку особливість впливу водню, як значна кількість великих глибоких ямок. Їх пов'язали з наявністю у структурі сталі досить великих неметалевих включень, зокрема сульфідів марганцю, які слабо зв'язані з матрицею. Водень сприяє їх декогезії від матриці і полегшує утворення великих ямок. На зламах, отриманих на повітрі траплялися лише дуже великі ямки. Отже, декогезія сульфідів від матриці може відбуватися і за випроб на повітрі, якщо ці частинки дуже великі, а менші частинки все ще зберігають зв'язок з матрицею. Рельєф зламів на ділянках зсуву зразків випробуваних на повітрі та у водні практично однаковий – дрібні, не глибокі без чіткого окантування ямки зсуву параболічної форми чергуються з великими. Особливістю випроб у водні є те, що на зсувних ділянках зламів великих ямок є більше, і вони більші за розмірами.

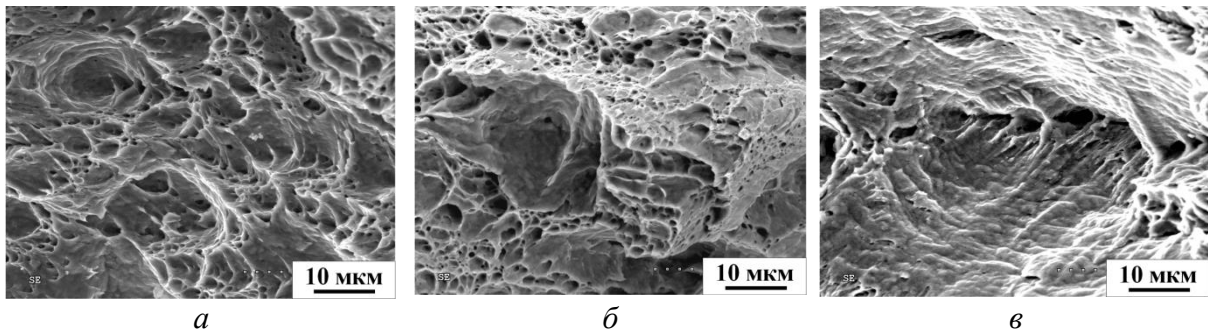


Рис. 1. Мікрофрактограми руйнування зразків сталі 2,25Cr-1Mo у вихідному стані після випроб на повзучість за температури 450 °С на повітрі (а) та у водні (б, в) за початкового рівня напружень $\sigma_0 = 330$ МПа.

В центральній частині перерізів зразків, випробуваних на повітрі, спостерігали ямки зі значною компонентою зсуву (рис. 1а), і лише на невеликих за площею ділянках нормального відриву – рівновісні ямки відриву. Тоді як за випроб у водні, ямки добре окреслені, різні за розмірами і практично рівновісні (рис. 1б). Особливістю зламів є те, що плиткі ямки на зламах, отриманих за випроб на повітрі, скоріше виняток, тоді як у водні їх кількість і розміри істотно більші, а глибина істотно менша ніж на повітрі. На твірних поверхнях великих ямок добре вирізнялися сліди текучості у вигляді паралельних фронтів відриву у вигляді хвилястих ліній, які окреслили етапність їх росту під час повзучості (рис. 1в). Їх можна трактувати як дископодібні мікротріщини, ріст яких пришвидшив абсорбований металом водень. На зламах зразків, випробуваних у водні, часто на твірних поверхнях плитких ямок спостерігали смуги ковзання, які перетиналися (рис. 1в). Таку особливість трактували як доказ збільшення систем ковзання за випроб у водні.

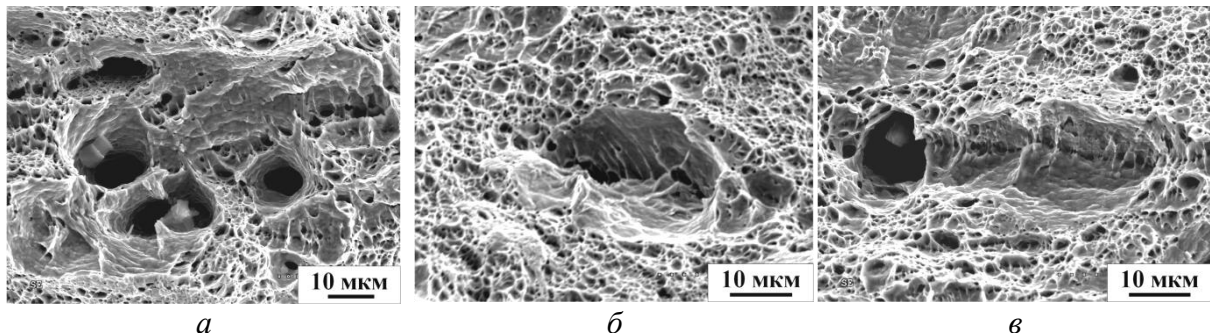


Рис. 2. Фрактограми зламів зразків сталі 2,25Cr-1Mo після витримування в реакторі гідрокрекінгу нафти впродовж $6 \cdot 10^4$ год, отримані після випроб на повзучість за температури 450 °С у водні за початкового рівня напружень $\sigma_0 = 475$ МПа.

За випроб у водні в експлуатованому металі глибокі ямки навколо неметалевих включень, що розташовані безпосередньо в зоні руйнування, виглядають на поверхні зламу значно більшими і глибшими (рис. 2а), ніж в не експлуатованому, в якому вони звикло виникають навколо дуже великих включень. Отже, декогезія неметалевих включень з матрицею може відбуватися також під впливом водню з випробувального середовища. У цьому випадку великі за діаметром і довжиною включення, або їх ланцюжки стають достатню потужними джерелами водню, щоб інтенсифікувати ріст плитких великих ямок у вигляді дископодібних мікротріщин (рис. 2б). Ще одна особливість експлуатованого металу це наявність на зламах більшої кількості плитких ямок. Причому вони витягнені по ширині зразка, де максимальні умови стиснення деформації, і формуються шляхом злиття дрібніших порожнин (рис. 2в).

За нижчого рівня навантаження в експлуатованій сталі глибокі ямки майже рівновісні (рис. 3б) і їх стає значно більше, причому за рахунок ямок з меншим, ніж в неексплуатованому металі діаметром. Їх твірні поверхні практично нормально орієнтовані до поверхні зламу з хвилястими, перервними лініями множинного ковзання, які практично не відрізняються від слідів ковзання на бічних поверхнях

зразків. Внаслідок повзучості у водні, який інтенсифікує деформацію в мікрооб'ємах, ці порожнини витягувалися аж до виходу на макроповерхню зламу, а чіткі сліди ковзання на їх твірних поверхнях зафіксували послідовність такого деформування. Це може бути доказом існування цих порожнин в експлуатованому металі ще до випроб на повзучість. Адже, загалом густина подібних ямок в неексплуатованій сталі, випробуваній у водні, значно менша.

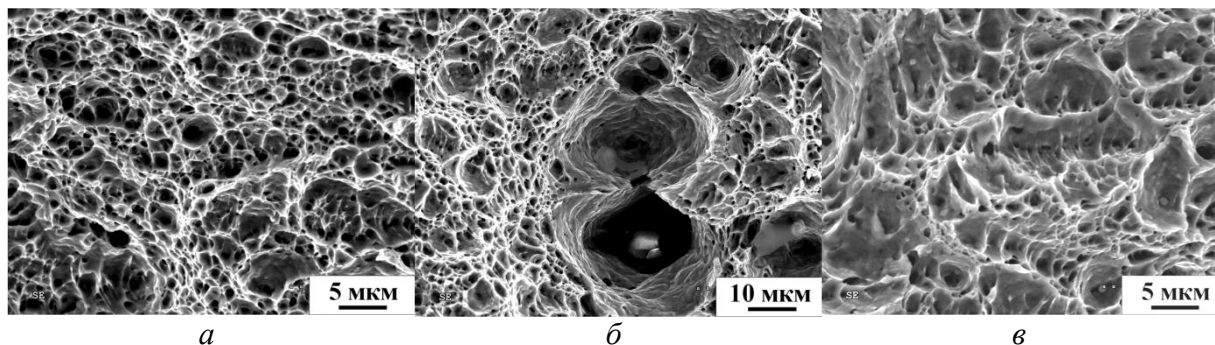


Рис. 3. Фрактограми центральної частини зламів зразків сталі 2,25Cr-1Mo у вихідному стані (а), та витриманої в реакторі гідрокрекінгу нафти впродовж $6 \cdot 10^4$ год (б, в), отримані після випроб зразків на повзучість за температури $450 \text{ }^\circ\text{C}$ у водні за початкового рівня напружень $\sigma_0 = 330 \text{ МПа}$.

За високої роздільної здатності виявили відмінності за формою та розмірами дрібних ямок на локальних ділянках нормального відриву в центральній частині зламів. За випроб на повітрі експлуатованого металу дрібні ямки відривного характеру були практично рівновісними, а за випроб у водні дрібніші мікропорожнини зливаючись формували витягнені вздовж ширини зразків більші порожнини зі значним ексцентриситетом (рис. 2 та рис. 3в). За випроб на повітрі такі ознаки руйнування були скоріше винятком.

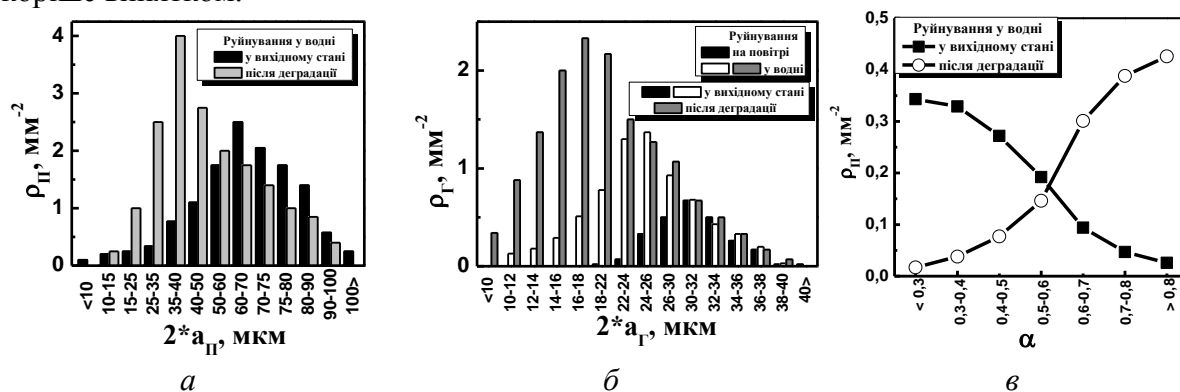


Рис. 4. Розміри плитких $a_{п}$, глибоких $a_{г}$ ямок та їх густина $\rho_{п}$ (а) і $\rho_{г}$ (б), які аналізували на поверхнях зламів зразків сталі 2,25Cr-1Mo у вихідному стані (чорні і білі стовпчики) та після експлуатації (сірі стовпчики), випробуваних у водні (а) і на повітрі (чорні стовпчики) та у водні (білі та сірі стовпчики, б) та зміна густини великих плитких ямок $\rho_{Л}$ залежно від їх ексцентриситету α , металу у вихідному стані (білі позначення) та після експлуатації (чорні) за випроб у водні (в)

Порівняння впливу випробувального середовища (водень і повітря) на особливості механізму руйнування експлуатованого металу виявило, що попри практичну відсутність якісних змін за ознаками їх впливу (рис. 3) все ж існує різниця за кількісними параметрами елементів зламів. Зокрема, густина великих, але плитких $\rho_{п}$, і глибоких $\rho_{г}$ ямок в експлуатованому металі істотно вища ніж в неексплуатованому (рис. 4). Крім того густина $\rho_{г}$ за випроб у водні сталі у вихідному стані істотно вища, ніж за випроб на повітрі (рис. 4б), що вважали за ознаку полегшення їх утворення під впливом водню. Причому їх густина зростає за рахунок утворення більшої кількості дрібніших ямок навколо менших включень (скоріш за все до руйнування долучилися ще і карбіди, когезивний зв'язок яких з матрицею через їх меншу поверхню контактування є сильнішим, ніж неметалевих

включень). Це свідчить про залучення до руйнування у водні все більшої кількості структурних складових, що сприяє локалізації деформування та пришвидшує руйнування. Тенденція зменшення розмірів ямок за зростання їх густини зберігається і в експлуатованій сталі (рис. 4а). Кількісне оцінювання такої ознаки впливу водню на деградований метал як ексцентриситет ямок α (співвідношення довжини малої і великої півосей видовжених по ширині зразків плитких ямок) виявило, що в експлуатованому металі густина ямок з великим ексцентриситетом більша ніж з малим, тоді як в неексплуатованому навпаки (рис. 4б). Це свідчить про те, що злиття рівновісних мікропорожнин в еліпсоподібні в експлуатованому металі відбувається легше, що зв'язали з впливом водню, абсорбованого металом під час експлуатації в реакторі, який легко постачається по розсіяних структурних пошкодах навколо неметалевих включень (як по коридорах) і полегшує їх злиття в зоні найвищого стиснення деформації в центральній частині перерізу зразків.

Таким чином, на основі проведеного фрактографічного аналізу сталі 2,25Cr-1Mo у вихідному стані та після експлуатації в реакторі гідрокрекінгу нафти, випробуваної у водні і на повітрі можна стверджувати, що попри загалом в'язкий характер її руйнування існують особливі фрактографічні ознаки впливу водню, як середовища під час випроб на повзучість, і ознаки прояву деградації металу в часі його тривалої експлуатації в реакторі гідрокрекінгу нафти.

Висновки: За впливу водню на зламах виявили: плиткі ямки, які виникають внаслідок злиття дрібних мікропорожнин під впливом абсорбованого металом водню і ростуть з утворенням дископодібних нормально орієнтованих макротріщин; глибокі ямки, спричинені декогезією неметалевих включень від матриці, сліди ковзання на твірних поверхнях яких подібні до спостережених на бічних поверхнях зразків.

Внаслідок деградації сталі змінюється кількість, величина та форма плитких ямок. Зокрема в неексплуатованій сталі плиткі ямки завбільшки 70...170 мкм практично круглі і утворюються злиттям дрібних (до 2 мкм) мікропорожнин. Тоді як в деградованій сталі цих ямок більше, вони стають еліпсоподібними (співвідношення їх осей досягає 1:10) і утворюються шляхом злиття більших за розмірами порожнин (до 5 мкм), ланцюжки яких розташовуються вздовж їх великої осі.

Особливим фрактографічним проявом деградації сталей є великі, глибокі ямки, спричинені декогезією неметалевих включень від матриці ще на етапі експлуатації. Під час випроб на повзучість сталі з такою поруватою структурою ці підповерхневі (стосовно поверхні зламу) порожнини, наповнені воднем, служать легкими шляхами постачання водню до зони локалізації деформації і інтенсифікують ріст дископодібних порожнин в зоні локалізації деформації. Вони практично відсутні за випроб неексплуатованої сталі на повітрі і з'являються за її випроб у водні у вигляді лише великих ямок (70...150 мкм). Попри незмінність кількості таких ямок за випроб у водні експлуатованої сталі густина дещо дрібніших ямок (40...70 мкм) в ній істотно зростає. Їх трактували як пошкодження, що виникли під час попередньої експлуатації і додатково розкрилися під час повзучості.

Література

1. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах / А.М. Локощенко. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – Т. 37, № 4. – С. 27–41.
2. Testing of welded 2.25CrMo steel, in hot, high-pressure hydrogen under creep conditions / G. Manna, P. Castello, F. Harskamp [et al.]// Engineering Fracture Mechanics. – 2007. – V. 74. – P. 956–968.
3. Бабій Л. Властивості корпусної сталі 15X2МФА за умов повзучості у газоподібному водні / Бабій Л., Студент О., Загурський А. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец.вип. – 2008. – № 7, Т. 1. – С. 100–105.
4. Бабій Л. Оцінювання тривалої міцності корпусних сталей реактора гідрокрекінгу нафти з використанням параметра Ларсона-Міллера / Бабій Л., Студент О., Загурський А. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Спецвипуск — частина 2. — С.177-184.