

УДК 620.192

ФРАКТОГРАФІЧНІ ОЗНАКИ МЕХАНІЗМІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДНЮ В КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЯХ

Г. В. КРЕЧКОВСЬКА

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

Виявлено різні мікрофрактографічні ознаки поширення тріщин у сталях за впливу наводнювальних середовищ, пов'язані з транспортуванням водню в зону передруйнування у вершині тріщини за дифузійним чи дислокаційним механізмами. Міжзеренний характер руйнування за циклічного навантаження вказує на домінування дифузії водню вздовж меж зерен, тоді як кризьзеренний – спричинений сумісним впливом дислокаційного механізму, який забезпечує інтенсивне наводнювання металу вздовж смуг ковзання, та дифузійного, який сприяє перерозподілу водню міжфазними межами всередині зерен.

Ключові слова: *мікрофрактографія, сталь, воднева деградація, ріст тріщин, механізм руйнування.*

Мікрофрактографічний аналіз – потужна складова досліджень матеріалознавчих аспектів конструктивної міцності металів [1]. Поверхня зламу віддзеркалює сукупність деталей руйнування, а їх аналіз дає можливість виділити найхарактерніші з них і пов'язати з дією того чи іншого чинника (механічного, структурного, температурного чи корозійного). Особливо важливий цей метод для вивчення механізмів руйнування сталей під впливом наводнювальних середовищ [2–5]. Спільною ознакою дії водню на механізм руйнування є падіння його енергоємності. При цьому на зламі з'являються елементи рельєфу, які засвідчують зниження енергетичних витрат на просування тріщини. Тут механізм руйнування матеріалів може кардинально помінятися (з в'язкого на кризь- або міжзеренний, розшарування тощо), а також залишитися практично незмінним. Але на локальному рівні ознаки окрихчувального впливу водню, як правило, все ж виявляються.

Важливою стадією підготування локальних областей матеріалу (зокрема, зони передруйнування у вершині тріщини) до спричиненого воднем руйнування є акумулювання там достатньої його концентрації, яка зазвичай набагато перевищує середню в об'ємі металу. Розглядають два основних механізми транспортування водню в зону передруйнування [6–8]: дифузійний і дислокаційний, які загалом вважають за конкурентні. Перший чинний за тривалого статичного, другий – за повільного активного та циклічного навантажень. Домінування того чи іншого суттєво залежить також від температури випроб та мікроструктурних особливостей матеріалу.

Нижче проаналізовано можливості застосування мікрофрактографічного аналізу, щоб з'ясувати інформативні ознаки впливу водню на характер руйнування сталі, причому в першу чергу, у зв'язку з чинним механізмом його транспортування.

Міжзеренне руйнування. Його однозначно пов'язують з полегшеним дифузійним проникненням водню в метал уздовж меж зерен (зокрема, в гартованих сталях – це колишні аустенітні зерна). Цей механізм властивий, у першу чергу, високоміцним сталям і є ознакою високої чутливості меж зерен до водневого окрихчення. Тут слід взяти до уваги не лише металознавчі аспекти міжзеренної

крихкості (сегрегації шкідливих домішок, виділення і коагуляція карбідів, їх декогезія від матриці з утворенням пор), але і полегшену дифузію водню вздовж меж зерен та сприятливі умови для його накопичення в дефектах.

За результатами кількісного мікрофрактографічного аналізу можна знайти частку міжзеренного руйнування D на зламі як співвідношення його площі, що припадає на міжзеренне руйнування, до загальної. яке визначатиме схильність сталі до водневої крихкості. Водночас показник D , розрахований за даними експертизи експлуатаційного пошкодження, можна використати для діагностування фактичного технічного стану експлуатованого металу і оцінити, наскільки він близький до критичного. Для цієї ж мети як характеристику поточного стану експлуатованих теплозв'язаних сталей раніше використовували ефективний пороговий розмах коефіцієнта інтенсивності напружень $\Delta K_{th\,eff}$ [9]. Через виявлену інверсію впливу водню на цей показник запропоновано метод оцінювання граничного стану металу і, відповідно, визначено критичне значення $\Delta K_{th\,eff}^c$, за досягнення якого подальша експлуатація сталі стає небезпечною [10]. З іншого боку, деградацію теплозв'язаних сталей внаслідок тривалої високотемпературної експлуатації часто пов'язують з розвитком розсіяної пошкодженості, що проявляється у формуванні елементів міжзеренного руйнування. Використавши встановлену за результатами моделювання деградації в лабораторних умовах кореляційну залежність між механічною ($\Delta K_{th\,eff}$) та фрактографічною (D) характеристиками стану по-різному деградованого металу (рис. 1), можна за результатами фрактографічної експертизи після конкретного часу експлуатації з'ясувати, наскільки він ще придатний до подальшого використання. Зокрема, для сталі 15X1M1Ф критичне значення $\Delta K_{th\,eff}^c = 1,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ і йому відповідає критична частка міжзеренного руйнування D^c , рівна $\sim 30\%$.

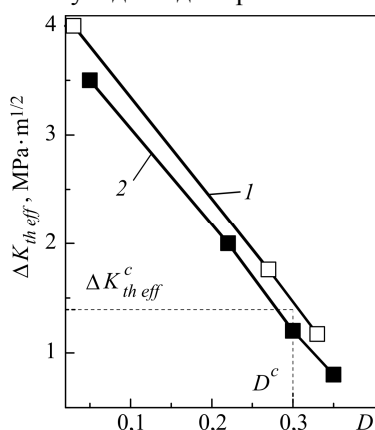


Рис. 1. Зв'язок частки міжзеренного руйнування D з ефективним пороговим рівнем циклічної тріщиностійкості $\Delta K_{th\,eff}$ сталі 15X1M1Ф головного парогону ТЕС після її деградації за зупинок енергоблоків (1) та термоциклів у водні в лабораторних умовах (2).

Fig. 1. Relationships between the ratio of intergranular fracture D and an effective threshold level of the fatigue crack growth resistance $\Delta K_{th\,eff}$ of 15X1M1Ф steel from the main steam pipeline of HPP degraded due to a different number of shut-downs of power units (1) or thermocycles in hydrogen in laboratory conditions (2).

Крізьзеренне руйнування. З підвищенням пластичності сталей зростає роль рухомих дислокацій у транспортуванні водню. Тому руйнування частіше відбувається за крізьзеренним механізмом. Яскравим прикладом такого особливо низькоенергоємного руйнування є крізьзеренний відкол, який вказує на зниження під впливом водню напружень відриву. За подальшого підвищення пластичності сталей можливість реалізації механізму відриву зменшується. Його змінює водневе розшарування, спричинене тиском рекомбінованого водню.

Крихке крізьзеренне воднево-механічне руйнування не обов'язково зумовлене поширенням тріщини строго вздовж площин ковзання. Зокрема, особливістю руйнування бейнітових сталей є те, що хоча стосовно колишніх аустенітних зерен тріщина поширюється за крізьзеренним механізмом, але щодо пластин бейніту всередині цих зерен – вздовж їх меж, а отже, за міжзеренним. Ілюструє також мішане руйнування рис. 2а. Руйнування вздовж меж бейнітних пластин відбувається, очевидно, і внаслідок міжкристалітного водневого окрихчення їх меж, і через дифузію водню вздовж смуг ковзання в зоні передруйнування у вершині

тріщини. Адже для транспортування водню сприятливими є не лише смуги інтенсивної пластичної деформації матеріалу, але і межі бейнітних пластин з властивими їм структурними дефектами. Ідентифікувати такий крізьзеренний щодо зерен аустеніту, але міжзеренний для бейнітних пластин механізм руйнування складніше, ніж класичне уздовж меж колишніх аустенітних зерен.

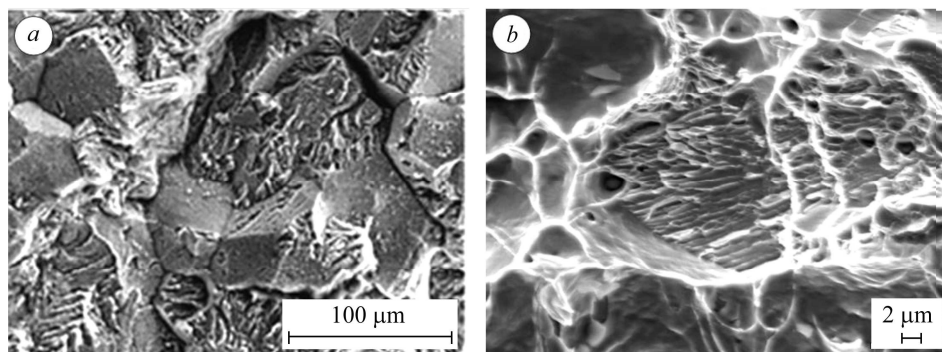


Рис. 2. Мішане руйнування за між- і крізьзеренним механізмами низьколегової сталі під впливом водню.

Fig. 2. Mixed-mode fracture of the low-alloy steels under the influence of hydrogen by inter- and transgranular mechanisms.

Інший приклад особливого прояву крізьзеренного руйнування пов'язаний з експлуатаційною деградацією низьковуглецевої сталі з феритно-перлітною структурою [11], в якій також не виключена можливість впливу на руйнування водневого чинника. Мікрофрактографічним аналізом зламів зразків, випробуваних на ударну в'язкість, виявили фрагменти крізьзеренного руйнування перлітних зерен на фоні в'язкого міжзеренного феритної матриці (рис. 2b). Водночас у межах крізьзеренних фрагментів чітко ідентифікували межі фериту і цементиту. Чіткість міжфазних меж в перліті забезпечило вторинне розтріскування уздовж них. Тобто і в цьому випадку крізьзеренне руйнування пов'язане не зі смугами ковзання, а з дифузійним перерозподілом водню вздовж міжфазних границь у межах перлітного зерна. Припускали, що водень міг транспортуватися вглиб перлітного зерна рухомими дислокаціями, а потім вже дифузійним шляхом перерозподілявся вздовж міжфазних меж фериту і цементиту.

ВИСНОВКИ

Конкурентноспроможність дифузійного і дислокаційного механізмів транспортування водню в зону передруйнування мікрофрактографічно проявляється часткою міжзеренного та крізьзеренного руйнування на зламах сталей. Виявлено, що за впливу наводнювального середовища таку частку міжзеренного руйнування на припороговій ділянці втомного росту тріщини можна використовувати для діагностування реального технічного стану деградованої в експлуатаційних умовах сталі. Крім того, встановлено, що крізьзеренне руйнування (вздовж меж зерен бейніту в міцних сталях та меж зерен перліту у пластичних) не завжди спричинене перенесенням водню за дислокаційним механізмом уздовж площин ковзання. В тривало експлуатованих сталях всередині зерен бейніту чи перліту можливе руйнування вздовж міжфазних меж через дифузійний перерозподіл водню на них.

РЕЗЮМЕ. Виявлені різні мікрофрактографічні ознаки розповсюдження тріщин в сталях при впливі наводороживаючих серед, пов'язані з транспортуванням водню в зону передруйнування в вершині тріщини за дифузійним або дислокаційним механізмами. Міжзеренний характер руйнування при циклічеській нарузці вказує на домінування дифузійного транспортування водню вздовж границь зерен, тоді як транскризеренний характер руйнування спричинений спільним впливом дислокаційного механізму, який забезпечує інтенсивне наводороживання металу вздовж площин

скольжения, и диффузионного, который способствует перераспределению водорода по межфазных границах внутри зерен.

SUMMARY. Different microfractographic features of crack propagation in steel under the influence of hydrogenating environments, related to the transportation of hydrogen in the prefracture zone at the crack tip by diffusion or dislocation mechanisms were revealed. The intergranular fracture under cyclic loading indicates the domination of the hydrogen transportation by diffusion along grain boundaries. The transgranular fracture is caused by the combined effect of dislocation mechanism providing an intensive hydrogenation of metal along slip bands, and diffusion mechanism, which promotes hydrogen redistribution along the interphase boundaries within the grains.

1. Романів О. М., Зима Ю. В., Карпенко Г. В. Електронна фрактографія зміцнених сталей. – К.: Наук. думка, 1974. – 208 с.
2. *Effect of high-temperature degradation of heat-resistant steel on mechanical and fractographic peculiarities of fatigue crack growth* / O. Z. Student, W. Dudzinski, H. M. Nykyforchyn, A. Kamińska // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **34**, № 4. – С. 49–58.
(*Effect of high-temperature degradation of heat-resistant steel on the mechanical and fractographic characteristics of fatigue crack growth* / O. Z. Student, W. Dudziński, H. M. Nykyforchyn, A. Kamińska // Materials Science. – 1999. – **35**, № 4. – P. 499–508.)
3. Студент О. З., Марков А. Д., Никифорчин Г. М. Особливості впливу водню на властивості і механізм руйнування металу зварних з'єднань парогонів ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 4. – С. 26–35.
(*Student O. Z., Markov A. D., Nykyforchyn H. M. Specific features of the influence of hydrogen on the properties and mechanism of fracture of the metal of welded joints of steam pipelines at thermal power plants* // Materials Science. – 2006. – **42**, № 4. – P. 451–460.)
4. *Effect of hydrogenation on fracture mode of a reactor pressure vessel steel* / N. Taylor, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyurulnyk, O. Z. Student // Materials Science. – 2009. – **45**, № 5. – С. 5–16.
(*Effect of hydrogenation on the fracture mode of a reactor pressure-vessel steel* / N. Taylor, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyurulnyk, O. Z. Student // Materials Science. – 2009. – **45**, № 5. – P. 613–625.)
5. Остап О. П., Витвицький І. І. Двоїстість дії водню на механічну поведінку сталей і структурна оптимізація їх водневотривкості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 4. – С. 5–19.
(*Ostap O. P., Vytvyts'kyi V. I. Duality of the action of hydrogen on the mechanical behavior of steels and structural optimization of their hydrogen resistance* // Materials Science. – 2012. – **47**, № 4. – P. 421–437.)
6. *Ускорення* процессов самодиффузии в металлах под влиянием растворенного водорода / В. М. Сидоренко, В. В. Федоров, Я. В. Барабаш, В. И. Похмурский // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1977. – **13**, № 6. – С. 27–30.
(*Acceleration of self-diffusion processes in metals under the influence of dissolved hydrogen* / V. M. Sidorenko, V. V. Fedorov, L. V. Barabash, and V. I. Pokhmurskii // Materials Science. – 1978. – **13**, № 6. – P. 607–610.)
7. Katz Y., Tytiak N., and Gerberich W. W. The dynamic nature of hydrogen assisting crack extension // J. of Achievements in Mater. and Manufact. Eng. – 2006. – **18**, № 1–2. – P. 123–126.
8. *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. – **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* / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, A. D. Markov // Materials Science. – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)
9. Beachem C. D. A new model for hydrogen-assisted cracking (hydrogen “embrittlement”) // Metallurgical Transactions. – 1972. – **3**, № 2. – P. 441–455.
10. СОУ 40.3–0013044–20:2010. Нормативний документ. Настанова. Оцінювання технічного стану металу прямих ділянок головних парогонів ТЕС. Вплив зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану експлуатованого металу. Типова інструкція. – Львів: ДП “ЛКБ” і ФМІ НАНУ, 2010. – 52 с.
11. *Опір* крихкому руйнуванню металу сіткової гіперболоїдної вежі Шухова / Г. В. Кречковська, О. З. Студент, А. І. Кутний, Г. М. Никифорчин, П. Я. Сидор // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 4. – С. 87–93.
(*Brittle-fracture resistance of the metal of hyperboloid gridshell Shukhov tower* / H. V. Krechkovs'ka, O. Z. Student, A. I. Kutnyi, H. M. Nykyforchyn, P. Ya. Sydor // Materials Science. – 2015. – **50**, № 4. – P. 578–584.)

Одержано 20.04.2015