

УДК 539.3

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ОПІРНІСТЬ РУЙНУВАННЮ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ 65Г

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, С. Т. ШТАЮРА, Ю. В. МОЛЬКОВ,
Т. М. ЛЕНКОВСЬКИЙ

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

Подано результати досліджень впливу водню на руйнування листової ресорно-пружинної сталі 65Г. Визначено розподіл деформацій методом цифрової кореляції спекл-зображень та топографію поверхні зразка перед вершиною тріщини і встановлено, що водень знижує деформацію руйнування у 1,5 рази. Виявлено зниження тріщиностійкості сталі 65Г у водні на 14% порівняно з повітрям. Проведено фрактографічний аналіз поверхні зламу зразків та досліджено морфологію поширення тріщини металографічним методом. Встановлено, що зниження експлуатаційних характеристик сталі 65Г за дії водню проявляється в локалізації пластичних деформацій та інтенсивному розшаруванні по стиках шарів вальцювання.

Ключові слова: *вуглецева пружинна сталь, вплив водню, пластична деформація, вершина тріщини, шари вальцювання, розподіл деформацій, топографія поверхні зони передруйнування, коефіцієнт інтенсивності напружень, поверхня зламу, морфологія поширення тріщини.*

Водень є одним із тих агресивних чинників, який знижує експлуатаційні характеристики елементів конструкцій у робочих середовищах. Під час роботи він нагромаджується в порах, порожнинах, мікротріщинах в об'ємі пластично деформованого металу. Підвищена концентрація водню в таких макро- та мікрооб'ємах призводить до водневого окрихчення [1], інтенсифікує розвиток пошкоджень незворотного характеру. В результаті цього знижуються службові характеристики металу такі, як робота на зародження і поширення тріщини, опірність руйнуванню [1].

Воднева деградація металів та сплавів, яка спостерігається в хімічній, енергетичній, нафтопереробній та інших галузях промисловості, призводить до матеріальних збитків. На сьогодні найрозповсюдженішим конструкційним матеріалом в індустрії є сталь. У сталь водень проникає під час її виготовлення, термічної обробки, а також під час контакту робочого обладнання з водневим середовищем [2, 3]. Підвищена температура і тиски робочого середовища сприяють прониканню водню в об'єм матеріалу деталей.

Вивчаючи дію водню, значну увагу приділяють дослідженням його впливу на жароміцні та трубні сталі [4, 5, 6]. Але нерідко водень контактує із низьколегованими вуглецевими сталями. Відомі випадки виходу з ладу пластинчастих пружин після травлення їх у розчині сірчаної кислоти через водневе окрихчення [7].

Тому мета дослідження – встановити особливості руйнування у водні та визначити характеристики опірності руйнуванню пластично деформованої листової вуглецевої сталі 65Г.

Зразки, обладнання та методика досліджень. Досліджували листову ресорно-пружинну сталь 65Г наступного хімічного складу: 0,62...0,7% С; 0,17...0,37% Si; 0,9...1,2% Mn; <0,25 Ni; <0,25% Cr; <0,2% Cu; <0,035% S; <0,035% P. Механічні властивості сталі 65Г такі: $\sigma_{0,2} = 600$ МПа; $\sigma_B = 700$ МПа; $\delta = 12\%$; $\Psi = 30\%$.

Зразки для досліджень виготовляли з гарячекатаного листа завтовшки 2 mm так, щоб волокна вальцювання були розташовані у площині поширення тріщини перпендикулярно до прикладених зусиль.

Для випробувань використали пластинчасті зразки з центральною тріщиною, які наводнювали з газової фази у спеціальній накладній камері [8], пропускаючи струм від знижувального трансформатора. Зразки нагрівали струмом до температури 200°C впродовж 3 h за тиску водню 0,25 МПа, а після наводнювання разом з камерою встановлювали на випробувальну машину EUS-20 та створювали втомну тріщину відносної довжини $e = 0,2$, згідно з методикою [9], за асиметричного циклу навантаження з коефіцієнтом асиметрії $R = 0,2$.

Після утворення втомної тріщини зразок статично навантажували до моменту її старту, фотографуючи відеокамерою VQ 29A з об'єктивом для макрозйомки ділянку біля вершини тріщини розміром 3×4 mm. Методом цифрової кореляції спекл-зображень (ЦКСЗ) [10] обробляли отримані зображення і будували графіки розподілу деформацій у зоні перед вершиною тріщини на момент її старту для баз деформування 0,5; 1,0 та 1,5 mm на повітрі та у водні. Використовуючи метод ЦКСЗ, встановлювали вектори зміщень точок поверхні на продовженні тріщини відносно їх початкового положення у напрямку координат Ox та Oy з початком координат у вершині тріщини. Тоді числові значення еквівалентної деформації для вказаних баз деформування визначають з виразу $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2}$, де ε_x , ε_y – деформація вздовж осей Ox та Oy , відповідно.

Водночас на протилежній стороні біля вершини тріщини на полірованій поверхні зразка за допомогою мікроскопа МБС-10 з вмонтованою відеокамерою для реєстрації зображення на моніторі візуально оцінювали розвиток пластичної зони попереду тріщини під час навантаження зразка.

Тріщиностійкість сталі 65Г на повітрі і у водні оцінювали за силовим підходом та визначали критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_C [9] за силовою схемою розтягування пластини з центральною тріщиною.

Для аналізу розмірів і форми пластично деформованої ділянки металу біля вершини тріщини використовували дані, отримані за допомогою розробленого тензометричного пристрою, який є аналогом профілометра. Він дає змогу неперервно вимірювати переміщення у двох взаємоперпендикулярних напрямках (вздовж осі Oy , перпендикулярної до площини тріщини, та осі Oz , перпендикулярної до площини зразка). Переміщення вздовж осі Ox , в напрямку поширення тріщини, вибирали дискретно з кроком 0,5 mm за допомогою мікрогвинта. Під час вимірювання наконечник пристрою пересувається по поверхні зразка, описуючи профіль западин і виступів у пластичній зоні перед вершиною тріщини. За результатами вимірювань, використовуючи відповідне програмне забезпечення, будували тривимірне зображення поверхні западини.

Для фрактографічних та металографічних досліджень вирізали фрагмент зразка розміром 6×8 mm від вершини тріщини в напрямку її поширення. Фрактографічні дослідження берегів тріщини проводили на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP за різних збільшень. Мікрошліфи для металографічних досліджень травили за кімнатної температури 4%-им розчином азотної кислоти в ізоаміловому спирті. Обстежували шліфи на металографічному мікроскопі МИМ-6, обладнаному спеціальною фотокамерою та персональним комп'ютером для відтворення цифрового зображення.

Результати досліджень та їх аналіз. За результатами розрахунків встановлено, що для зразків, випробуваних у водні, максимальні еквівалентні деформації у вершині тріщини на момент її старту становлять 5,8%, а для зразків, випробуваних на повітрі – 9,2% (рис. 1а, б). Також спостерігають збільшення розкиду де-

формацій матеріалу в околі вершини тріщини для цих зразків, тоді як у водні розкид деформацій для різних баз деформування незначний. При цьому під час візуальних спостережень виявлено, що у водні зона пластично деформованого матеріалу перед вершиною тріщини менша за площею. Це вказує на локалізацію пластичних деформацій.

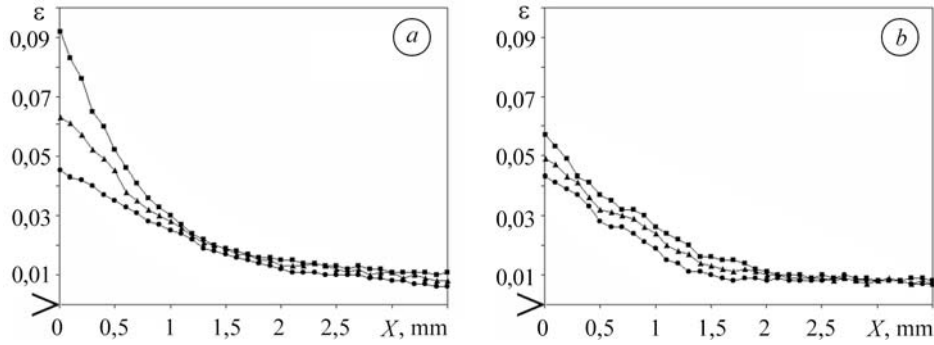


Рис. 1. Розподіл деформацій перед вершиною тріщини на повітрі (а) та у водні (b) на момент її старту для баз деформування 0,5 mm (■); 1,0 mm (▲); 1,5 mm (●).

Fig. 1. Distribution of deformations ahead of the crack tip at the moment of its start in air (a) and in hydrogen (b) for bases of deformation 0.5 mm (■); 1.0 mm (▲); 1.5 mm (●).

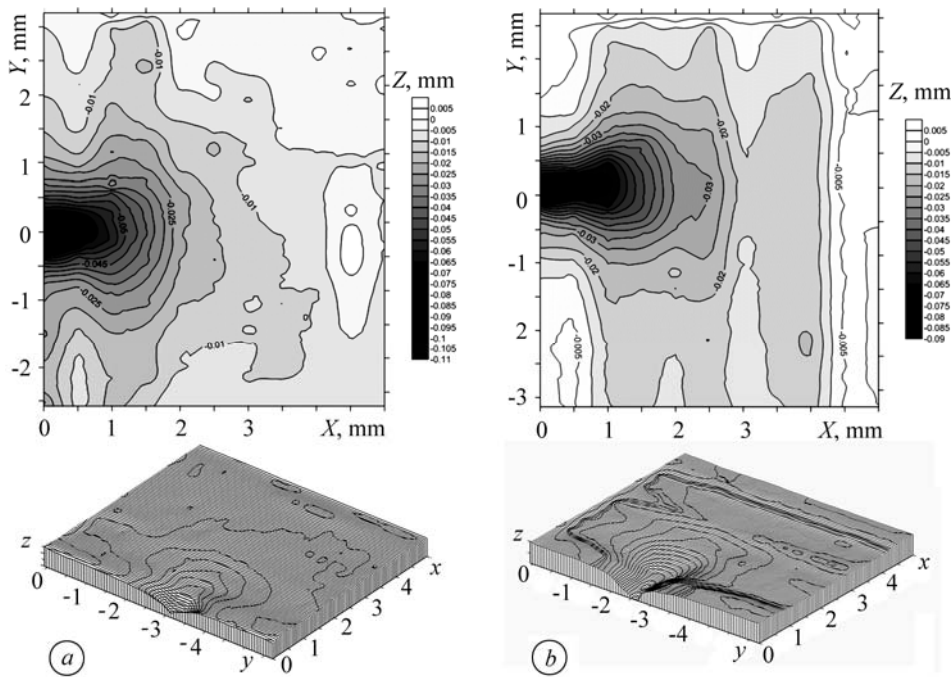


Рис. 2. Топографія профілю поверхні зразка в околі вершини тріщини на повітрі (а) та у водні (b).

Fig. 2. Topography of the specimen surface profile near the crack tip in air (a) and in hydrogen (b).

Зниження характеристик пластичності під дією водню призводить також і до зменшення зусилля старту тріщини на 8% за статичних випробувань. При цьому тріщиностійкість сталі знижується з $K_c = 58 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ на повітрі до $K_c = 50 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ у водні, що свідчить про окрихчувальну дію водню.

За результатами аналізу топографії поверхні зразка перед вершиною тріщини (ділянка 5×6 mm) встановлено, що максимальна глибина западини у водні ста-

новить 0,09 mm (рис. 2b), а на повітрі 0,110 mm (рис. 2a), що відповідає відносно-му звуженню ψ по товщині зразка 9,0% та 11,0%, відповідно. Западина у водні локалізованіша, має крутіші схили і витягнуту форму. Крутизну схилів оцінювали за кутом між двома дотичними до протилежних нахилів западини, проведеними з центру її дна. Цей кут становить у водні 150°, а на повітрі 170°.

В результаті фрактографічного аналізу виявлено, що на ділянці втомного поширення тріщини поверхня руйнування у водні (рис. 3b) має значно більшу рельєфність, ніж на повітрі (рис. 3a). У водні спостерігається значне розшарування матеріалу по текстурі деформування, яка утворилася внаслідок вальцювання – технології виготовлення листової сталі. Це пояснюється негативним впливом водню, концентрація якого найвища в об'ємах металу з найбільшою густиною мікропор, забруднень та мікропошкоджень. На ділянках статичного поширення тріщини на повітрі (рис. 3c) топографія поверхні характеризується ознаками в'язкого руйнування. Спостерігаються чашкові утворення – димпли різних форм та розмірів, а також розшарування матеріалу по текстурі деформування. У водні (рис. 3d) на фоні розшарувань по текстурі деформування і димплової будови в'язкого зламу зустрічаються ділянки крихкого транскристалітного руйнування. На поверхні сколів утворюється система сходинок – річковий рисунок. Такі відмінності є результатом негативного впливу водню, який спричиняє локальне окрихчення матеріалу, знижуючи опір поширенню тріщини.

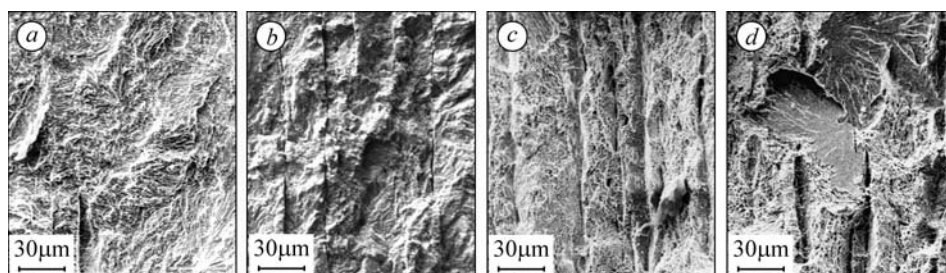


Рис. 3. Топографія зламу на ділянці поширення тріщини на повітрі (a, c) та у водні (b, d) за циклічного (a, b) та статичного (c, d) навантаження.

Fig. 3. Topography of fracture surface in air (a, c) and in hydrogen (b, d) on the section of cyclic (a, b) and static (c, d) crack growth.

За результатами металографічного аналізу виявили, що тріщина на повітрі (рис. 4a) поширюється у площині перпендикулярно до осі прикладених навантажень. Значних стрибків або зміни траєкторії росту тріщини відносно початкової не спостерігається. У водні траєкторія поширення тріщини є сходиноподібна і на окремих ділянках вона співпадає з напрямом прикладених навантажень (рис. 4b). Це пояснюється значною зміною опору руйнуванню в окремих локальних зонах матеріалу. Такими зонами є стики шарів вальцювання в текстурі деформування листової сталі. Внаслідок підвищеної густини дефектів вплив водню в цих ділянках максимальний. Поглинутий водень спричиняє локальне водневе окрихчення і підвищує анізотропію властивостей матеріалу.



Рис. 4. Морфологія поширення тріщини за статичного навантаження на повітрі (a) та у водні (b).

Fig. 4. Morphology of the static crack growth in air (a) and in hydrogen (b).

ВИСНОВКИ

Максимальна деформація руйнування сталі 65Г біля вершини тріщини у водні зменшується в 1,5 рази, а також змінюється форма і розміри пластичної зони. Тріщиностійкість K_C сталі 65Г внаслідок окрихчувальної дії водню знижується на 14% порівняно з повітрям. У водні траєкторія поширення тріщини сходиноподібна, що є наслідком його локальної дії та підвищення анізотропії властивостей сталі.

РЕЗЮМЕ. Представлено результати дослідження впливу водорода на руйнування листової ресорно-пружинної сталі 65Г. Определено распределение деформаций методом цифровой корреляции спекл-изображений и топографию поверхности образца перед вершиной трещины и установлено, что водород уменьшает деформацию в 1,5 раза. Выявлено снижение трещиностойкости стали 65Г в водороде на 14% в сравнении с воздухом. Проведено фрактурграфический анализ поверхности излома образцов и исследовано морфологию распространения трещины металлографическим методом. Установлено, что снижение эксплуатационных характеристик стали 65Г вследствие влияния водорода проявляется в локализации пластических деформаций и интенсивном расслоении по стыках слоев вальцевания.

SUMMARY. The results of researches of the hydrogen influence on fracture of sheet spring 65Г steel are presented. Deformation distribution by the method of digital correlation of speckl images and topography of the specimen surface ahead of the crack tip are determined and it is shown that hydrogen decreases deformation in 1.5 times. A 14% decrease of the crack growth resistance of 65Г steel as a consequence of hydrogen embrittlement to compare with air is found. Fractographic analysis of the fracture surface and analysis of the morphology of the crack propagation were carried out. It is established that decrease of operating characteristics of the material as a result of hydrogen influence is revealed in localization of plastic deformations and intensive lamination on the rolling layers joints.

1. *Ткачев В. И., Холодный В. И., Левина И. И.* Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. – Львов: Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко, 1999. – 256 с.
2. *Balitskii A. I. and Panasyuk V. V.* Workability assessment of structural steels of power plant in hydrogen environment // Проблемы прочности. – 2009. – № 4. – С. 69–75.
3. *Kurzylowski K. and Nykyforchyn H.* Degradacja wodorowa materialow konstrukcyjnych w premysle energetycznym i petrochemicznym // Problemy eksploatacji. – 2003. – **51**, № 4. – S. 7–18.
4. *Некоторые вопросы прочности материалов и элементов конструкций в водородной энергетике / А. И. Белогулов, В. С. Рачук, М. А. Рудис, В. И. Холодный // Альтернативная энергетика и экология. – 2004. – № 5. – С. 12.*
5. *Фишгойт А. В., Колачев Б. А.* Випробування на міцність у водні в аерокосмічній промисловості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – № 4. – С. 151–154.
(*Fishgoit A. V. and Kolachev B. A.* Strength Tests in Hydrogen in the Aerospace Industry // Materials Science. – 1997. – **33**, № 4. – P. 568–573.)
6. *Воднева деградація тривало експлуатованих сталей магістральних газопроводів / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь та ін. // Там же. – 2007. – № 5. – С. 97–104.*
(*Tsyurul'nyk O. T., Nykyforchyn H. M., Petryna D. Yu., Hredil' M. I., and Dz'oba I. M.* Hydrogen Degradation of Steels in Gas Mains after Long Periods of Operation // Materials Science. – 2007. – **43**, № 5. – P. 708–717.)
7. *Карпенко Г. В., Крипякевич Р. И.* Влияние водорода на свойства стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 195 с.
8. *Патент на винахід № 90531.* Камера для випробування плоских зразків за одно- та двовісного навантаження у середовищі водню / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський. – Опубл. 2010, Бюл. № 9.
9. *ГОСТ 25.50 6-85.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Гос. Ком. СССР по стандартам, 1985. – 60 с.
10. *Панасюк В. В., Іваницький Я. Л., Максименко О. П.* Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 67–72.
(*Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., and Maksymenko O. P.* Analysis of the Elastoplastic Deformation of the Material in the Process Zone // Materials Science. – 2004. – **40**, № 5. – P. 648–655.)

Одержано 10.02.2011