

УДК 620.197.5

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НАВОДНЮВАННЯ ЗА ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР НА МІЦНІСТЬ СТАЛІ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЕС

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ^{1,2}, М. М. ГВОЗДЮК¹, Д. В. КЛИМЕНКО³,
М. В. ГРИНЕНКО¹, О. П. МАКСИМЕНКО¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ ДП "КП "Тієденне" ім. М. К. Янгеля", Дніпро

Проаналізовано експлуатаційні умови для моделювання та оцінювання інваріантних характеристик міцності парогенераторної сталі 22К за підвищеної температури та дії газоподібного водню. Показано важливість використання енергетичного критерію, який враховує зміну істинних напружень і деформацій за дії внутрішнього тиску при підвищених температурах водневого середовища. Побудовано діаграми граничного стану сталі 22К за сумісної дії механічного навантаження та підвищених температур. Запропоновано підхід для визначення ступеня пошкодження трубопроводу за експлуатаційних умов на основі співвідношення енергії пружно-пластичного деформування та питомої енергії руйнування сталі 22К.

Ключові слова: парогенераторна сталь 22К, енергетичний підхід, водневе середовище, підвищена температура, залишкова міцність.

The operating conditions for modeling and evaluating the invariant strength characteristics of 22K steam-generator steel at high temperature and the action of gaseous hydrogen are analyzed. The importance of using the energy criterion, which takes into account the change in true stresses and strains under the action of internal pressure at high temperatures of the hydrogen medium, is demonstrated. Diagrams of the limit state of 22K steel under the combined effect of mechanical load and high temperatures are constructed. An approach to determining the degree of pipeline damage under operating conditions based on the ratio of elastic-plastic deformation energy and specific fracture energy of 22K steel is proposed.

Keywords: steam generator 22K steel, energy approach, hydrogen environment, high temperature, residual strength.

Вступ. Визначення міцності та залишкового терміну експлуатації елементів конструкцій атомної і теплової енергетики, зокрема труб парогенератора в умовах [1] підвищених температур та взаємодій з воденьвмісним середовищем, вимагає від дослідників при перепризначенні терміну експлуатації для продовження ресурсу роботи використовувати підходи, які б адекватно врахували зміни фізико-механічних характеристик металу.

Надійність труб парогенераторів та їх міцність залежить від фізико-механічних процесів, які відбуваються під час робочого циклу. Зокрема, загальна корозія із внутрішньої сторони труби зазвичай рівномірно розподілена на всій поверхні [2, 3]. Крім цього, ця поверхня піддається місцевій корозії під напруженням, що може призвести до локального руйнування. Також інтенсифікують локальне пошкодження матеріалу труби залишкові напруження та збільшення концентрації водню, який утворюється внаслідок реакції робочого середовища з металом труб [4].

Контактна особа: М. М. ГВОЗДЮК, e-mail: hvozdiuk@ipm.lviv.ua

Враховуючи, що нагромадження пошкоджень по всьому об'єму металу відбувається нерівномірно, то використання класичних критеріїв не дає можливості об'єктивно оцінити реальний ресурс роботи об'єкта.

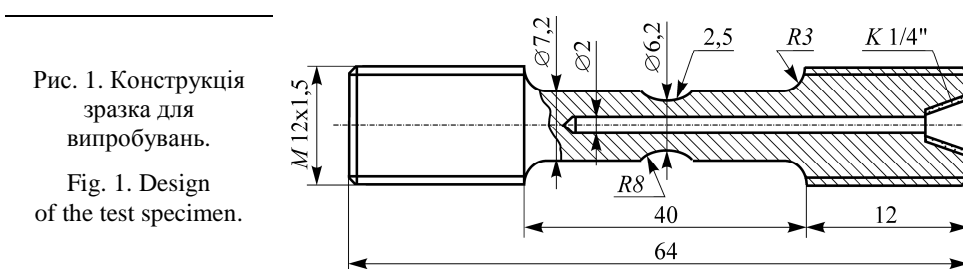
Тому достовірно оцінити міцність матеріалу та ступінь пошкодження елементів конструкцій, які працюють за підвищених температур у водневому середовищі, можна на основі оцінювання зміни фізико-механічних характеристик у локальному об'ємі. Зокрема, використавши сучасні обчислювальні методи розрахунку з врахуванням експлуатаційних чинників та концентраторів напружень, можна розрахувати напружено-деформований стан у цьому об'ємі. Виконавши відповідні експериментальні дослідження на зразках з використанням безконтактних методів контролю, можна встановити інваріантні характеристики матеріалу та їх зміну із врахуванням впливу середовища за експлуатаційних параметрів.

Використання безконтактного дистанційного методу оптико-цифрової кореляції для реєстрації переміщення деформівної поверхні під час побудови повних рівноважних та істинних діаграм [5] дає можливість визначати питому енергію деформування та руйнування матеріалу труби (сталь 22К) із врахуванням дії водневого середовища і підвищених температур. Такий підхід можна використовувати для визначення напружено-деформованого стану елементів трубопроводу за експлуатаційних умов, оцінки енергії деформування у найнавантаженому місці безпосередньо на трубопроводі та ступінь пошкодження і можливість подовження ресурсу безпечної роботи.

Мета роботи – дослідити вплив водневого середовища і підвищених температур на зміну фізико-механічних характеристик сталі 22К та встановлення ступеня енергетичного пошкодження трубопроводу парогенератора.

Матеріал, обладнання та методика досліджень. Досліджували сталь 22К, з якої виготовляють трубопроводи парогенератора, який експлуатують за температури 400°C в умовах підвищеного тиску до 1,4 МПа. За тривалої експлуатації під дією експлуатаційних чинників у матеріалі труби нагромаджуються структурні пошкодження, які впливають на безпечну роботу конструкції. Під дією механічного навантаження та водню змінюються фізико-механічні характеристики матеріалу до настання граничного стану. Для достовірної оцінки безпечно терміну експлуатації труб необхідно визначити механічні характеристики сталі за умов наближених до експлуатаційних, а також реальний напружено-деформований стан трубопроводу безпосередньо за робочих параметрів.

З досліджуваної сталі виготовляли циліндричні зразки із внутрішнім глухим отвором для випробування за схемою осьового розтягу (рис. 1) за підвищених тиску газоподібного водню та температури.



Випробовували на універсальній гідравлічній розривній машині Neckert EUS-20. Досліджували вплив газоподібного водню за підвищеної температури на фізико-механічні характеристики сталі 22К за схемою на рис. 2 з використанням модернізованої камери (рис. 3).

Зразок 1 з тягами 2, 3 встановлювали в камеру 4. Через трубопровід 5 і отвір у тязі 3 підводили водень до зразка 1. Після відкачування повітря форвакуумним

насосом 6 із внутрішнього отвору зразка в систему напускали газоподібний водень заданого тиску із балона 7. Заповненим воднем зразок нагрівали до температури 400°C за допомогою трансформатора 8 підведенням напруги до тяг 2 і 3 з допомогою кабелів 9, 10 і витримували 24 h. Контролювали температуру терморпарою і цифровим терморегулятором у діапазоні $\pm 5^\circ\text{C}$. Потім зразок навантажували розтягом на розривній машині EUS-20 зі швидкістю переміщення рухомого захоплювача 1 mm/min, з одночасною реєстрацією на комп'ютері зусилля розтягу динамометром за допомогою перетворювача аналогового сигналу I-Card F-440 та підсилювача.

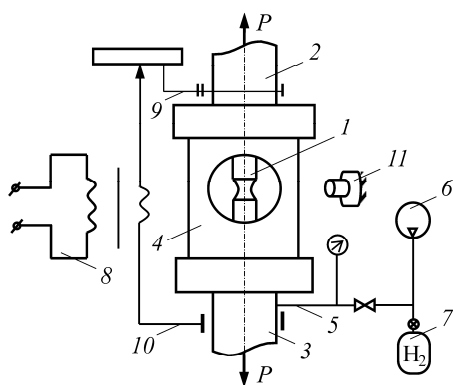


Рис. 2. Схема випробування циліндричних зразків за підвищеної температури у водні: 1 – зразок; 2, 3 – тяги машини; 4 – камера; 5 – трубопровід; 6 – форвакуумний насос; 7 – балон з воднем; 8 – трансформатор; 9, 10 – кабелі; 11 – цифрова камера.

Fig. 2. Scheme of testing of cylindrical samples at elevated temperature in hydrogen: 1 – sample; 2, 3 – traction machine; 4 – chamber; 5 – pipeline; 6 – forevacuum pump; 7 – cylinder with hydrogen; 8 – transformer; 9, 10 – cables; 11 – digital camera.

Паралельно із навантаженням через вікно камери 4 дистанційно реєстрували видовження робочої зони зразка для встановлення значення локальної деформації з допомогою цифрової фотокамери Tourcam UCMOS 1000 KPA, закріпленої на спеціальному кронштейні, а зображення реєстрували на комп'ютері. Отримані результати заміряних переміщень обробляли з використанням програмного забезпечення Power Graph 3.3.8.



Рис. 3. Загальний вигляд випробувальної камери.

Fig. 3. General view of the test chamber.

Досліджували за описаною схемою, випробовуючи зразки у вихідному стані матеріалу, а також після попередньо пластичного деформування на задане значення деформації. Під час експерименту визначали загальне видовження зразка, а також значення деформації на базі 0,5 mm у двох напрямках, яка для даної сталі є незалежною. За результатами випробування будували діаграму руйнування в координатах “істинні напруження S_T –істинна деформація e ” та визначали напруження розтягу із врахуванням звуження поперечного перерізу зразка [6–9]. Зміну діаметра зразка під час пружно-пластичного деформування реєстрували методом оптико-цифрової кореляції спекл-зображень [6]. Енергію руйнування для зразків, випробуваних на повітрі та у водні, визначали як різницю пружно-пластичного деформування $W(x, y, z)$ та пружних

складових W_{el} за формулою

$$W_c = W(x, y, z) - \frac{1}{2} S_{el} \cdot \epsilon_{el}, \quad (1)$$

де S_{el} – напруження в пружній області; ϵ_{el} – деформації в пружній області.

Енергію пружно-пластичної складової руйнування $W(x, y, z)$ у виразі (1) визначали за формулою

$$W(x, y, z) = \int_0^e S(e) de. \quad (2)$$

Також випробовували зразки попередньо деформовані до пластичного стану на повітрі та у водні.

За істинною деформацією e_{el} на основі діаграм руйнування визначали енергію пружно-пластичного деформування W_d . Після цього зразок розвантажили і подальшим навантаженням руйнували та визначали питому енергію попередньо пластично деформованого матеріалу і розраховували величину W_p .

Енергію руйнування W_c^{el} сталі 22К на повітрі визначали за формулою

$$W_c^{el} = W_d + W_p. \quad (3)$$

Аналогічно випробовували попередньо деформовані зразки до енергії W_d , які наводнювали в камері упродовж 24 h і після цього руйнували та визначали питому енергію руйнування W_c^H як суму енергій попереднього деформування W_d^H і пружно-пластичного руйнування W_p^H

$$W_c^H = W_d^H + W_p^H. \quad (4)$$

Міру енергетичного пошкодження на повітрі ω_{air} та у водні ω_H визначали як відношення енергії пружно-пластичного деформування $W(x, y, z)$, отриманої за формулою (2), до критичного значення на повітрі W_c^{air} і у водні W_c^H

$$\omega_{air} = W(x, y, z) / W_c^{air}, \quad (5)$$

$$\omega_H = W(x, y, z)_H / W_c^H, \quad (6)$$

де $W(x, y, z)$, $W(x, y, z)_H$ – біжуче значення енергії пружно-пластичного деформування на повітрі та у водні, а W_c^{air} і W_c^H – відповідно граничні значення.

Результати досліджень та їх аналіз. Енергію руйнування зразків зі сталі 22К розраховували як площу під істинними діаграмами “ S_i-e ”, випробуваних на повітря та після попереднього наводнення (рис. 4).

Обчислення площі за точками, отриманими із експерименту, здійснювали в Excel за формулою

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{i^*-1} (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_{i+1} + y_i), \quad (7)$$

де i^* – значення, що відповідає руйнуванню.

Встановлено, що питома енергія руйнування у водні на 17% менша, ніж на повітрі. При цьому граничні напруження у водні є на 5% більші, ніж на повітрі.

Водночас максимальна деформація на повітрі є на 22,7% більша, ніж у водні, що вказує на те, що міцність сталі 22К у водні практично незмінна. Пониження деформаційної характеристики у водні вказує на окрихчення, яку пояснюємо зменшенням пластичності сталі. Результати попереднього пластичного деформування сталі 22К до 75% від граничного значення деформації подано на рис. 5.

Питома енергія руйнування попередньо пластично деформованих зразків у водні зменшується на 30% порівняно з повітрям. Гранична деформація попередньо пластично деформованих зразків у водні є меншою за деформацію руйнування таких зразків на повітрі на 30,5%, що пояснюємо зменшенням процентного об'єму матеріалу, який бере участь у пластичному деформуванні і руйнуванні.

На основі результатів експериментальних досліджень встановлено міру енергетичного пошкодження для сталі 22К, яка графічно подана на рис. 6.

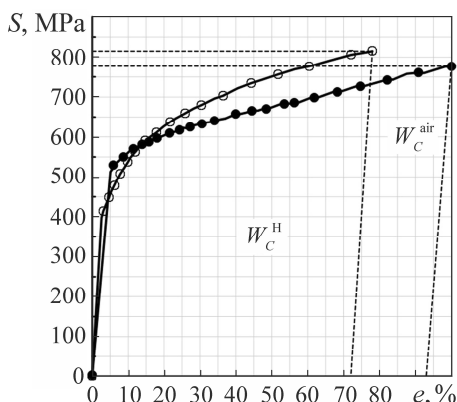


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Істинні діаграми руйнування зразків сталі 22К на повітрі (●) та у водні (○).

Fig. 4. True diagrams of fracture 22K steel samples in air (●) and hydrogen (○).

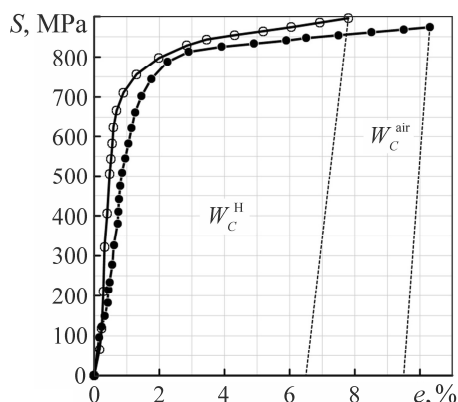


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Істинні діаграми попередньо деформованих зразків сталі 22К на повітрі (●) та у водні (○).

Fig. 5. True diagrams of pre-deformed 22K steel samples in air (●) and hydrogen (○).

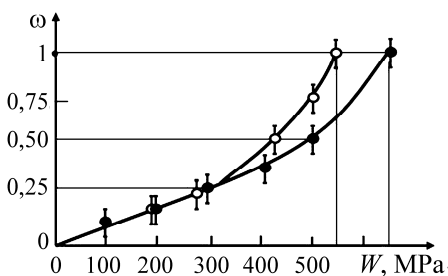


Рис. 6. Зміна міри енергетичної пошкоженості сталі 22К: ● – повітря; ○ – водень.
Fig. 6. Change in the degree of energy damage to 22K steel: ● – air; ○ – hydrogen.

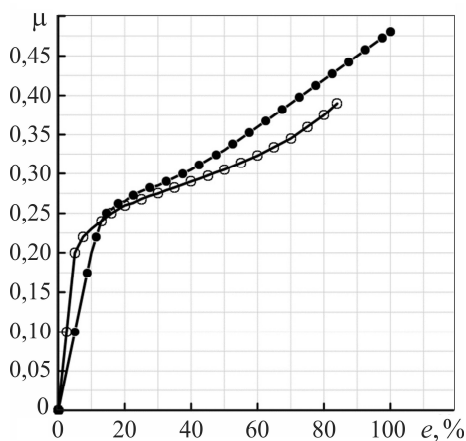


Рис. 7. Вплив робочого середовища на залежність коефіцієнта Пуассона від істинної деформації: ● – повітря; ○ – водень.

Fig. 7. Impact of the working environment on the dependence in Poisson's ratio on the true strain: ● – air; ○ – hydrogen.

У пружній зоні деформування, тобто, коли міра енергетичного пошкодження становить 0,25, питома енергія руйнування практично однакова для двох варіантів випробування. Зі збільшенням енергетичного пошкодження вона поступово знижується до 15,6% у граничному стані. За результатами експериментальних досліджень та визначених істинних поздовжніх і поперечних деформацій e_y і e_x побудовано графічну залежність коефіцієнта Пуассона μ для різних ступенів деформування зразків зі сталі 22К на повітрі та у водні (рис. 7).

У пружно-деформованій області коефіцієнт Пуассона для наводненої сталі менший, ніж на повітрі, що вказує на збільшення жорсткості напружено-деформованого стану в зразку.

Зростання деформації у водні до пружно-пластичного стану призводить до підвищення коефіцієнта Пуассона. Під час руйнування водень знижує коефіцієнт Пуассона для сталі 22К до 0,39, а у повітрі – 0,47, тобто різниця на 18%, що вказує на окрихчення сталі 22К і зниження її пластичних властивостей.

Таким чином, отримані істинні діаграми руйнування на повітрі і у водні за підвищених температур можна використовувати для оцінювання напружено-деформованого стану трубопроводу після тривалої експлуатації. Для цього необхідно встановити переносний оптико-цифровий корелятор на трубопроводі в експлуатаційних умовах, визначити локальну деформацію та з істинної діаграми руйнування сталі 22К встановити питому енергію пружно-пластичного деформування W_i , розрахувати міру енергетичного пошкодження ω_i , врахувати коефіцієнт запасу міцності та оцінити подальшу роботу трубопроводу.

ВИСНОВКИ

Розроблено методологію оцінювання впливу водню та підвищеної температури на міцність і деформацію сталі 22К. Встановлено, що питома енергія руйнування під впливом водню для зразків зі сталі 22К без попереднього деформування зменшується на 17% порівняно з ненаводненими. При цьому напруження руйнування у водні підвищуються на 5%, а істинна критична деформація знижується на 22,7%. Після попереднього деформування зразків до рівня 75% від граничної деформації питома енергія руйнування наводнених зразків зменшується на 27% порівняно з повітрям. Напруження руйнування у водні збільшуються на 3%, а істинна критична деформація знижується на 30,5%. Коефіцієнт Пуассона для сталі 22К у водні зменшується на 18%.

1. *Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смиян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления / Отв. ред. И. И. Василенко. – К.: Наук. думка, 1990. – 272 с.
2. *Dwivedi S. K. and Vishwakarma M.* Hydrogen embrittlement in different materials: A review // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2018. – **43**. – P. 21603–21616.
3. *Wasim M., Djukic M. B., and Ngo T. D.* Influence of hydrogen-enhanced plasticity and decohesion mechanisms of hydrogen embrittlement on the fracture resistance of steel // *Eng. Failure Analysis.* – 2021. – **123**. – Article Number: 105312.
4. *Effect of hydrogen on evolution of deformation microstructure in low-carbon steel with ferrite microstructure / K. Okada, A. Shibata, W. Gong, and N. Tsuji // Acta Materialia.* – 2022. – **225**. – Article Number: 117549.
5. *Determination of the local strains near stress concentrators by the digital image correlation technique / Ya. L. Ivanyts'kyi, Yu. V. Mol'kov, P. S. Kun', T. M. Lenkovs'kyi, and M. Wójtowicz // Materials Science.* – 2015. – **50**, № 4. – P. 488–495.
6. *Effect of pre-strain on hydrogen embrittlement of high strength steels / X. Li, Y. Wang, P. Zhang, B. Li, X. Song, and J. Chen // Mat. Sci. and Eng. A.* – 2014. – **616**. – P. 116–122.
7. *Hydrogen influence on fracture of sheet carbon steel / Y. Ivanytskyj, S. Shtayura, Y. Mokov, and T. Lenkovskiy // Int. J. Fract.* – 2012. – **176**, № 1. – P. 17–23.
8. *Panasyuk V., Ivanytskyi Ya., and Hembara O.* Assessment of hydrogen effect on fracture resistance under complex-mode loading // *Eng. Fract. Mech.* – 2012. – **83**. – P. 54–61.
9. *Syrotiyuk A. M., Leshchak R. L., and Dorosh M. I.* Experimental and analytic investigation of the hydrogenation of pipe steels // *Materials Science.* – 2017. – **53**, № 6. – P. 811–817.

Одержано 30.11.2021