

УДК 620.197.5: 669.788

ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ОЦІНЮВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ БАРАБАНА ПАРОВОГО КОТЛА ЗА ТЕРМОЦИКЛУВАННЯ ТА НАВОДНЮВАННЯ

О. В. ГЕМБАРА¹, О. Я. ЧЕПІЛЬ¹, Т. В. ГЕМБАРА²

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

² Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Розроблено метод для оцінювання впливу водню на міцність та довговічність барабана парового котла високого тиску за термоциклування і наводнювання. Проаналізовано дію водню на нагромадження пошкоджуваності металу та тривалість експлуатації барабана за різних режимів пошкодження. Встановлено, що водень пришвидшує нагромадження пошкоджуваності і зменшує час експлуатації металу за планової зупинки котла на 25...30%, а за аварійної – на 40...50%.

Ключові слова: концентрація водню, енергія деформування, пошкоджуваність, експлуатаційний ресурс, барабан парового котла.

Стандартні галузеві методики [1], за якими оцінюють експлуатаційний ресурс енергетичного обладнання, побудовані на основі простих інженерних формул для оболонки і стрижнів. Як показують літературні дані, зокрема результати досліджень [2, 3], розрахунки конструкційної міцності за такими підходами дають завищені оцінки напружено-деформованого стану (НДС), які у деяких випадках відрізнялись в рази. Крім того, вплив середовища враховується тільки додатковим введенням коефіцієнтів запасу для компенсації важчих умов роботи металів у водневмісних середовищах.

Але аналіз [4] показав некоректність такого підходу. Зокрема встановлено, що водень у декілька разів знижує довготривалу міцність циліндричних зразків під внутрішнім тиском водню. Відомо також, що за термомеханічного навантаження металів відбувається перерозподіл водню за його об'ємом. Зокрема показано [5–10], що його концентрація в зоні передруйнування в декілька разів перевищує середні значення. Тому під час оцінювання роботоздатності елементів енергетичного обладнання необхідно враховувати цей аспект.

З огляду на це, актуально і важливо визначити НДС елементів енергетичного обладнання за умов експлуатації з урахуванням їх реальної геометричної форми, водневої деградації металу, локальних пошкоджень та оцінити на цій основі їх експлуатаційний ресурс, можливість тимчасового продовження термінів експлуатації чи заміни вузлів та елементів енергетичного обладнання з пошкодженнями, а також виробити рекомендації щодо відповідних ремонтних заходів для подальшого використання.

Формулювання задачі. Розглядали металічне тіло з концентраторами напружень (рис. 1), яке піддане дії водневмісного середовища та змінного в часі силового і теплового навантаження. Внаслідок цього тіло деформується, а біля концентраторів напружень утворюються зони передруйнування, де і виникають пошкодження.

Відомо [9, 11, 12], що наводнювання змінює механічні властивості матеріалу і, зазвичай, це проявляється у збільшенні міцності та зменшенні пластичності (рис. 2). У результаті змінюються його енергетичні запаси, які повинні призвести до зміни характеристик опірності руйнуванню. Спрогнозувати, як саме це вплине на нагромадження пошкоджень у наводненому матеріалі важко, але оцінити можна шляхом аналізу зміни енергетичного балансу для розрахункового елемента.

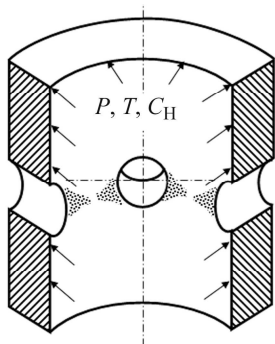


Рис. 1. Fig. 1.

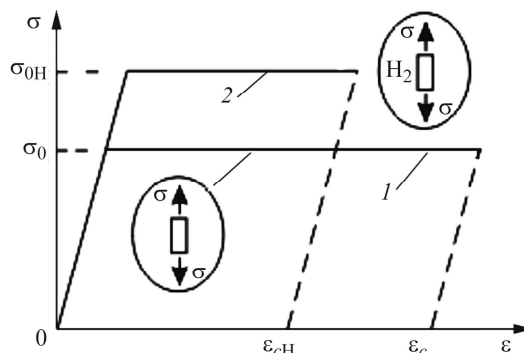


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 1. Схема навантаження тривимірному тілу з концентраторами напружень у водні.

Fig. 1. Loading mode of a three-dimensional solid with stress concentrators in hydrogen.

Рис. 2. Діаграми розтягу матеріалу на повітрі (1) та у водні (2) [9].

Fig. 2. Diagrams of material tension in air (1) and hydrogen (2) [9].

Тому для оцінювання пошкодженості матеріалу пружно-пластичного тіла за циклічного деформування використали енергетичний критерій руйнування локального об'єму елемента [9]

$$W(P_*, T_*, C_{H*}) = W_C^H, \quad (1)$$

де W – енергія деформування локального об'єму елемента; P_*, T_*, C_{H*} – тиск, температура та концентрація водню, за яких енергія деформування набуває критичного значення; W_C^H – характеристика опірності руйнуванню матеріалу за заданих умов навантаження, температури та робочого середовища.

За міру енергетичної пошкодженості прийнято відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму до її критичного значення [7]:

$$\omega = W(x, y, z, t) / W_C^H. \quad (2)$$

Енергію пружно-пластичного деформування визначають за гіпотезою Пальмгрена–Майнера

$$W(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \Delta W_i(x, y, z, t), \quad (3)$$

де N – кількість циклів; ΔW_i – приріст енергії деформування локального об'єму елемента за один цикл навантаження.

Руйнування елемента об'єму матеріалу настане в результаті досягнення рівності

$$\omega(x_*, y_*, z_*, t_*) = 1. \quad (4)$$

Енергію деформування визначають через розподіл еквівалентних напружень та деформацій:

$$W(x, y, z, t) = \iiint_V \sigma_e(x, y, z, t) \varepsilon_e(x, y, z, t) dV, \quad (5)$$

де σ_e , ε_e – еквівалентні напруження та деформації локального об'єму елемента, які залежать від механічних навантажень, температурного поля і концентрації водню:

$$\varepsilon(x, y, z, t) = \varepsilon_p(x, y, z, t) + \varepsilon_T(x, y, z, t, T) + \varepsilon_H(x, y, z, t, C_H, \sigma_h, T). \quad (6)$$

Враховуючи ефект Горського та експериментальні результати [9], залежність деформації від концентрації водню моделюємо лінійним законом:

$$\varepsilon_H = AC_H, \quad (7)$$

де A – коефіцієнт концентраційного водневого розширення.

Можливість, умови і термін продовження експлуатації високотемпературних елементів обладнання визначають згідно з виразом (1) шляхом зіставлення розрахункового значення поточної енергії деформування зони передруйнування з граничним його значенням, яке встановлюють за результатами експериментальних досліджень зразків із конструкційних легованих сталей у відповідних середовищах за експлуатаційних температур.

Моделювання напружено-деформованого стану фрагмента барабана парового котла високого тиску. Основні причини появи тріщин у барабанах під час експлуатації такі: високий рівень діючих напружень; значні змінні з часом температурні напруження, які виникають під час зупинок (особливо аварійних) і пусків котлів; воднева деградація і низька деформаційна здатність металу барабана.

Нижче подано основні результати, отримані комп'ютерним моделюванням деформування барабана котла з отворами за умов його експлуатації.

За розрахункову модель прийнято тривимірний порожнистий циліндр з отворами, змодельований відповідно до реальних розмірів барабана котла $R_1 = 0,805$ м, $R_2 = 0,9$ м, $d = 0,13$ м, $l_1 = 0,26$ м, $l_2 = 0,5$ м (рис. 3) та навантажений змінними в часі внутрішнім тиском і температурою ($T = 400 \pm 20^\circ\text{C}$, $P = 16 \pm 1,7$ МПа). Під час скінченно-елементного моделювання сітки фрагмент барабана розбито на 216000 елементів паралелепіпедоподібної форми.

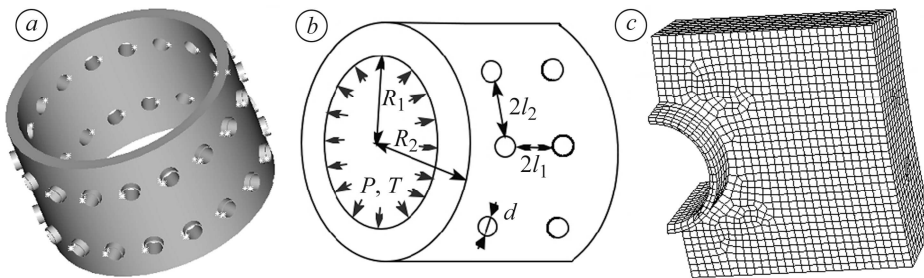


Рис. 3. Фрагмент барабана котла (а), його розрахункова схема (b) та розбиття на скінченні елементи (с).

Fig. 3. Fragment of boiler drum (a) its calculation mode (b) and splitting into finite elements (c).

Розраховували для таких режимів експлуатації: I – з плановим охолодженням зі швидкістю 5°C/h один раз на рік; II – стаціонарний режим термоцикування з плановим охолодженням зі швидкістю 5°C/h десять разів на рік; III – з аварійним охолодженням зі швидкістю 90°C/h десять разів на рік.

Задача про визначення напруженого стану циліндра за умов експлуатації полягає у встановленні просторово-часового розподілу температури, переміщень, деформацій і напружень з нестационарного тривимірного рівняння теплопровід-

ності та повної системи рівнянь неізотермічної термопружнопластичності за відповідних початкових і крайових умов. Вплив водню на нагромадження пошкодженості в металі враховується зміною концентрації водню, яку визначають з нестационарного тривимірного рівняння дифузії водню залежно від температурного поля і НДС [5–7]. Для розв’язування цих задач розроблено відповідні програми на основі методу скінченних елементів.

У результаті побудовано розподіли відносної концентрації водню (рис. 4a) та приросту енергії деформування за один цикл навантаження (рис. 4b) в околі концентратора напружень та на лінії від контуру до точки посередині між контурами отворів на повітрі та у водні за різних режимів експлуатації.

Встановлено, що наводнювання стінки барабана збільшує деформування матеріалу. Найбільші деформації виникають за режиму експлуатації із аварійним охолодженням.

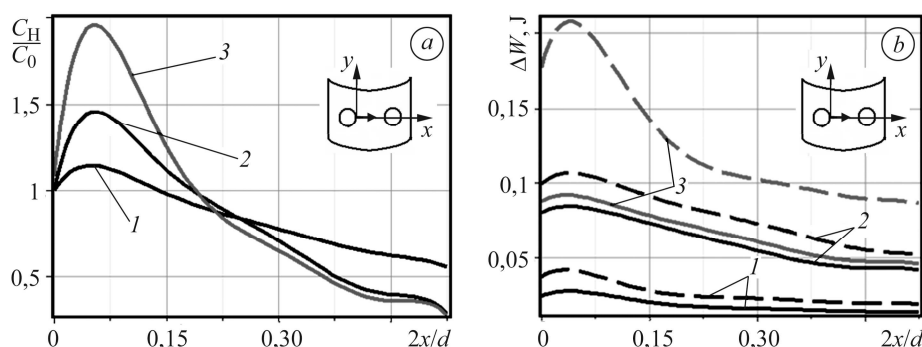


Рис. 4. Розподіл відносної концентрації водню (a) та приросту енергії деформування (b) від отвору до середини між контурами з урахуванням (штрихова лінія) та без (суцільна) впливу водневмісного середовища за різних режимів навантажень упродовж двох циклів (1 – режим I; 2 – режим II; 3 – режим III).

Fig. 4. Distribution of relative hydrogen concentration (a) and increase of the deformation energy (b) from the hole to the middle between circuits with (dashed line) and without (solid) the effect of hydrogen-containing environment in different loading modes for two cycles (1 – mode I; 2 – mode II, 3 – mode III).

Як видно з рис. 4a, за термоцикування відбувається перерозподіл водню із накопиченням біля концентратора напружень. За режиму експлуатації з аварійним охолодженням максимальне значення відносної концентрації водню в два рази більше за відповідне значення за планових зупинок.

Спостерігаємо, що в околі отвору на деякій відстані від нього максимальне значення енергії в два рази більше за енергію між отворами (рис. 4b). Крім того, водень, який внаслідок реакції водяної пари з металом парогенеруючих труб котлів продифундував у метал, збільшує енергію пружно-пластичного деформування металу за планової зупинки на 20...40%, а за аварійної – до двох разів.

Вплив наводнювання металу на нагромадження пошкодженості та час експлуатації барабана. Місцем зародження пошкодженості вважаємо той локальний об’єм матеріалу, де енергія пружно-пластичного деформування ΔW_p та ΔW_{pH} максимальні.

На рис. 5 показана зміна пошкодженості з часом експлуатації з урахуванням впливу водневого середовища (ω_{pH}) і без урахування (ω_p) для різних режимів експлуатації.

Як бачимо (рис. 5), швидкість охолодження та кількість зупинок суттєво впливають на нагромаджену пошкодженість металу та довговічність барабана в цілому.

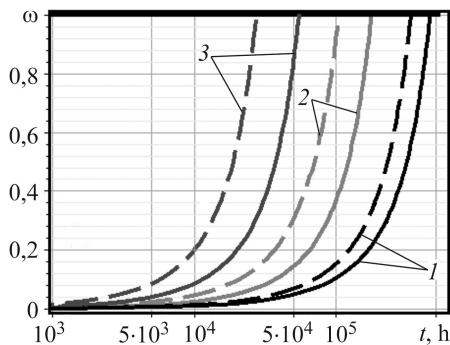


Рис. 5. Нагромадження пошкоджуваності з часом в околі концентратора напружень з урахуванням (ω_{pH} – штрихова лінія) та без (ω_p – суцільна) впливу водневмісного середовища за різних режимів експлуатації: 1 – режим I; 2 – режим II; 3 – режим III.

Fig. 5. Accumulation of damage with time, in the vicinity of a stress concentrator with (ω_{pH} – dashed line) and without (ω_p – solid line) the effect of hydrogen containing environment in different modes of loading: 1 – mode I; 2 – mode II; 3 – mode III.

Так, виконання протягом року десять планових зупинок (рис. 5) зменшує довговічність барабана котла у 2,5 рази порівняно з однією такою зупинкою. Аварійні зупинки ще додатково на 15% зменшують час роботоздатності барабана.

Ще одним суттєвим чинником, який впливає на довговічність, є експлуатаційне водневмісне середовище, яке пришвидшує нагромадження пошкоджуваності та зменшує тривалість експлуатації металу (див. таблицю) за планової зупинки котла на 25...30%, а за аварійної – на 40...50%.

Кількість циклів до руйнування барабана котла на повітрі та у водні за різних режимів експлуатації

Режим	Тривалість одного циклу, h	Кількість циклів до руйнування		Зменшення довговічності за дії водню, %
		за впливу водню	без впливу водню	
I	876	92	130	29
II	8760	39	52	25
III	876	20	37	48

ВИСНОВКИ

Застосовуючи енергетичний підхід, розробили метод оцінювання впливу водню на експлуатаційний ресурс барабана парового котла високого тиску за термоцикування і наводнювання. Створені на основі методу скінченних елементів алгоритм та програми дозволили змодельовати і проаналізувати зміну температурного поля, НДС, концентрації водню та нагромадження пошкоджуваності в фрагменті барабана котла, виготовленого зі сталі 22 К, за різних режимів експлуатації з урахуванням наводнювання стінки та реальної геометрії барабана. Показано, що водень пришвидшує нагромадження пошкоджуваності і зменшує тривалість експлуатації металу за планової зупинки котла на 25...30%, за аварійної – на 40...50%.

РЕЗЮМЕ. Разработан метод для оценки влияния водорода на прочность и долговечность барабана парового котла высокого давления при термоциклировании и наводороживании. Проанализировано влияние водорода на накопление повреждаемости металла и ресурс барабана при различных режимах эксплуатации. Установлено, что водород ускоряет накопление повреждаемости и уменьшает время эксплуатации металла при плановой остановке котла на 25...30%, а при аварийной – на 40...50%.

SUMMARY. The method for evaluating the impact of hydrogen on strength and durability of the drum of high pressure boiler under hydrogenation and thermal cycling is developed. The

influence of hydrogen on metal damage accumulation and the operation of the drum under different modes of operation are analyzed. It was established that hydrogen accelerates the accumulation of damage and reduces the operation time of metal at planned stops of a boiler by 25...30% and at emergency stop by 40...50%.

1. *Інструкція* СОУ 40.1-21677681-02:2009. Порядок продовження терміну експлуатації барабанів котлів високого тиску. – К.: Об'єднання енергетичних підприємств “Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики”, 2009. – 56 с.
2. *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.
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., Krechkovs'ka H. V., and Markov A. D.* 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 // *Materials science*. – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)
3. *Дробенко Б., Бурик О.* Математичне моделювання процесів деформування елементів конструкцій за термосилового навантаження // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології: наук. зб. – 2014. – Вип. 20. – С. 117–126.
4. *Овчинников И. И.* Влияние водородосодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них // Интернет-журнал “Науковедение”. – 2012. – № 4. – С. 1–28.
5. *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.
6. *Вплив напружено-деформованого стану на розподіл концентрації водню у зоні передруйнування* / В. В. Панасюк, Я. Л. Іваницький, О. В. Гембара, В. М. Бойко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 3. – С. 7–14.
(*Panasyuk V. V., Ivanyts'kyi Ya. L., Hembara O. V., and Boiko V. M.* Influence of the stress-strain state on the distribution of hydrogen concentration in the process zone // *Materials science*. – 2014. – **50**, № 3. – P. 315–323.)
7. *Іваницький Я. Л., Гембара О. В., Чепіль О. Я.* Оцінювання довговічності елементів енергетичного обладнання з урахуванням впливу експлуатаційного середовища // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 1. – С. 93–101.
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Hembara O. V., and Chepil' O. Ya.* Determination of the durability of elements of power-generating equipment with regard for the influence of working media // *Materials science*. – 2015. – **51**, № 1. – P. 104–113.)
8. *Stashchuk M. and Dorosh M.* Evaluation of hydrogen stresses in metal and redistribution of hydrogen around crack-like defects // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2012. – **37**. – P. 14687–14696.
9. *Теоретико-експериментальний підхід до оцінки втомного поширення тріщин у наводнених матеріалах* / Я. Л. Іваницький, П. С. Кунь, С. Т. Штаюра, В. М. Мочульський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 2. – С. 77–82.
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Kun' P. S., Shtayura S. T., and Mochul's'kyi V. M.* Theoretical-experimental approach to the analysis of fatigue crack propagation in hydrogenated materials // *Materials science*. – 2010. – **46**, № 2. – P. 213–220.)
10. *Андрейків О. С., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металічних матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
11. *Вплив водню на опірність руйнуванню листової сталі 65Г* / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 4. – С. 36–40.
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Shtayura S. T., Mol'kov Yu. V., and Lenkovs'kyi T. M.* Influence of hydrogen on the fracture resistance of 65G sheet steel // *Materials Science*. – 2012. – **47**, № 4. – P. 457–461.)
12. *Hydrogen influence on fracture of sheet carbon steel* / Y. Ivanytskyj, S. Shtayura, Y. Mol'kov, and T. Lenkovskyy // *Int. J. Fracture*. – 2012. – **176**, № 1. – P. 17–23.

Одержано 27.03.2016