

Оксана ГЕМБАРА¹, Ольга ЧЕПІЛЬ¹, Тарас ГЕМБАРА², Микола ГВОЗДЮК¹

**ВПЛИВ НАВОДНЮВАННЯ СТІНКИ КОЛЕКТОРА БАРАБАНА
ПАРОВОГО КОТЛА НА ЙОГО МІЦНІСТЬ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ
ЗА ТЕРМОЦИКЛЮВАННЯ**

¹ *Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060. E-mail: hembara@ipm.lviv.ua*

² *Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79000*

Oksana HEMBARA¹, Olha CHERPIL¹, Taras HEMBARA², Mykola HVOZDIUK²

**HYDROGENATION EFFECT ON THE STRENGTH AND LIFETIME OF THE
WALL OF BOILER DRUM COLLECTOR AT THERMAL CYCLING CONDITIONS**

¹ *Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine
5, Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine. E-mail: hembara@ipm.lviv.ua*

² *Lviv State University of Life Safety
35, Kleprivska Str., Lviv, 79000*

ABSTRACT

The cyclic resource of the collector drum of boiler from exposure to the entire spectrum of unsteady regimes during its operation estimated using the criterion of limit accumulated damage. It was found that most damages occurred on the outer wall of the drum in the vicinity of holes. A study of different forms of holes and found that the maximum local stresses occur in the vicinity of the hole at the peak of holes. It was shown that circular holes are the most optimal form because lifetime of collector with such holls is 40% larger than with the holes elliptical shapes. Hydrogen reduces longevity drum for all forms holes for the investigational treatment burden to 30%.

KEY WORDS: *hydrogen degradation, energy deformation, accumulation of damage, finite element method, thermal cycling, hydrogenation metal residual durability.*

ВСТУП

За тривалої дії механічних навантажень, змінних температур та водневої корозії металу в стінці барабана котла високого тиску утворюються різні дефекти і пошкодження, серед яких найнебезпечніші – тріщиноподібні. Як правило, їх усувають, вирізаючи частину металу разом із дефектною зоною, що змінює первинну форму конструкційного елемента, а отже, збурює напруження в околі таких зон.

Відповідно до методики, що регламентується нормативним документом [1], розрахунок тривалої міцності базується на визначенні коефіцієнту запасу тривалої міцності за значеннями еквівалентних напружень і границі тривалої міцності за заданої температури і терміну служби. Основна складність застосування методики пов'язана з визначенням еквівалентних напружень, які за певний період часу повинні відтворювати ефект вичерпування тривалої міцності матеріалу зі зміною напруженого стану. Тому проблема оцінювання і прогнозування роботоздатності деталей енергетичного обладнання з урахуванням усіх чинників залишається надзвичайно складною. Аналіз міцності є одним з найвідповідальніших етапів експертного обстеження, у результаті якого визначають фактичний запас міцності металу барабана парового котла станом на момент експертного обстеження, встановлюють відповідність барабана вимогам діючих норм міцності та рекомендують умови і терміни подальшої безпечної експлуатації.

Забезпечення високої надійності та тривалої міцності елементів конструкцій за загального скорочення часу на проведення дослідницько-конструкторських робіт та експерименталь-

них досліджень вимагає створення сучасних методів адекватного комп'ютерного моделювання процесів деформування та руйнування конструкцій. Для випадку циклічного навантаження конструкцій за дії водневмісних середовищ створення таких методів є наукоємною, складною та актуальною проблемою сьогодення.

Розроблена раніше авторами [2] методика дає можливість у стислі терміни проаналізувати поведінку того чи іншого конструктивного елемента з пошкодженням або ремонтною вибіркою матеріалу за умов моделювання експлуатаційних параметрів та отримати експертну оцінку запасу його міцності. Ці дані використовують, приймаючи рішення про можливість тимчасового продовження термінів експлуатації або потреби в заміні вузлів та елементів енергетичного обладнання з пошкодженнями, а також для вироблення рекомендацій щодо відповідних ремонтних заходів (вибору раціональних за напруженнями геометричних параметрів вибірок).

За допомогою розроблених засобів комп'ютерного моделювання деформування термо-механічних систем за дії комплексного навантаження [3] в даній роботі подано результати оцінювання впливу водню на напружено-деформований стан колектора барабана парового котла за умов експлуатації з урахуванням фізично нелінійного деформування, наводнювання металу, реальної геометрії колектора та різних форм "вибірок", нагромадження пошкодженості в ньому та час його експлуатації.

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ТЕРМОЦИКЛЮВАННЯ І НАВОДНЮВАННЯ

Під час тривалої експлуатації колекторів барабанів котлів високого тиску в них накопичуються пошкодження у вигляді тріщин, корозійних виразок, корозійно-втомного поверхневого розтріскування. Накопичення пошкоджень визначається умовами експлуатації і, головним чином, дією циклічних навантажень, що призводять до зниження пластичності в зонах концентрації напружень і виникнення тріщин. У разі виявлення пошкоджень дієвим способом їх ліквідації є виконання ремонтних "вибірок" – видалення частини металу разом з дефектною зоною (рис. 1) [1] з наступним її заварюванням.

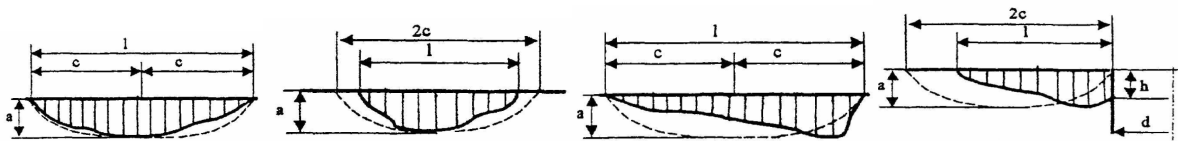


Рис. 1. Загальний вигляд дефектів та форм "вибірок" для їх ліквідації.

Fig. 1. General view of the defects and forms of "holes" to fill the gaps.

Для оцінювання пошкодженості матеріалу пружно-пластичного тіла за циклічного деформування використано енергетичний критерій [4]. За міру пошкодженості прийняли величину [2]

$$\omega_p(x, y, z, t) = W_p(x, y, z, t) / W_C \quad (1)$$

$$\omega_{pH}(x, y, z, t) = W_p^H(x, y, z, t) / W_C^H \quad (2)$$

де ω_p та ω_{pH} – міра пошкодженості, W_p та W_p^H – енергія деформування, W_C та W_C^H – енергія руйнування локального об'єму елемента на повітрі та у водні відповідно.

Руйнування елемента об'єму матеріалу настане в результаті досягнення рівності:

$$\omega(x_*, y_*, z_*, t_*) = 1 \quad (3)$$

Приріст енергії деформування визначали через розподіл еквівалентних напружень та еквівалентних деформацій:

$$\Delta W(x, y, z, t) = \iiint_V \Delta \sigma_e(x, y, z, t) \varepsilon_e(x, y, z, t) dV \quad (4)$$

де $\Delta \sigma_e$ – приріст еквівалентних напружень у локальному об'ємі елемента за один цикл навантаження; ε_e – еквівалентні деформації в локальному об'ємі елемента за один цикл навантаження, які залежать від механічних навантажень, температурного поля і концентрації водню.

$$\varepsilon(x, y, z, t) = \varepsilon_p(x, y, z, t) + \varepsilon_T(x, y, z, t, T) + \varepsilon_H(x, y, z, t, C_H, \sigma_h, T). \quad (5)$$

Враховуючи ефект Горського та експериментальні результати [4], зміну деформації від концентрації водню моделювали лінійним законом:

$$\varepsilon_H = AC_H, \quad (6)$$

де A – коефіцієнт концентраційного водневого розширення [5].

Отже, методика оцінювання роботоздатності елементів енергетичного обладнання за термоциклювання і наводнювання полягає у зіставленні розрахункового значення поточної енергії деформування зони передруйнування (4) з граничним його значенням, яке встановлюється за результатами експериментальних досліджень зразків із конструкційних легованих сталей у відповідних середовищах за експлуатаційних температур.

ВПЛИВ НАВОДНЮВАННЯ МЕТАЛУ НА МІЦНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ КОЛЕКТОРА БАРАБАНА СТАЦІОНАРНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ВИСОКОГО ТИСКУ ЗА РІЗНОЇ ФОРМИ РЕМОНТНИХ “ВИБІРОК”

За розрахункову модель колектора барабана котла високого тиску, виготовленого зі сталі 22К, прийняли тривимірний порожнистий циліндр з отворами, який змодельовали відповідно до реальних розмірів барабана котла ($R_1=0,805$ м, $R_2=0,9$ м, $d=0,1$ м, $l_1=0,26$ м, $l_2=0,56$ м) (рис. 2 а, б), навантаженого змінними в часі внутрішнім тиском і температурою (рис. 3). Енергію руйнування для сталі 22К визначили експериментально з використанням методу цифрової кореляції зображень [6]:

$$W_c = 4.2 \text{ Дж} \quad W_c^H = 3.28 \text{ Дж}. \quad (7)$$

Як бачимо, за впливу водню енергія руйнування знизилась на 25%.

З метою оцінки впливу форми “вибірок” на НДС металу в околі отворів провели дослідження різних форм “вибірок” із постійною малою піввіссю h та змінною великою віссю l (рис. 2 с). Розглядали стаціонарний режим експлуатації – термоциклювання та планове охолодження зі швидкістю $5 \text{ }^\circ\text{C/год}$ із частотою 8 разів на рік.



Рис. 2. Розрахункова схема (а) фрагменту барабана котла (б) за нестационарного термосилового навантаження з ремонтними “вибірками” (с).

Fig. 2. Diagram (a) of the boiler drum fragment (b) non-stationary thermal power load with repair "holes" (c).

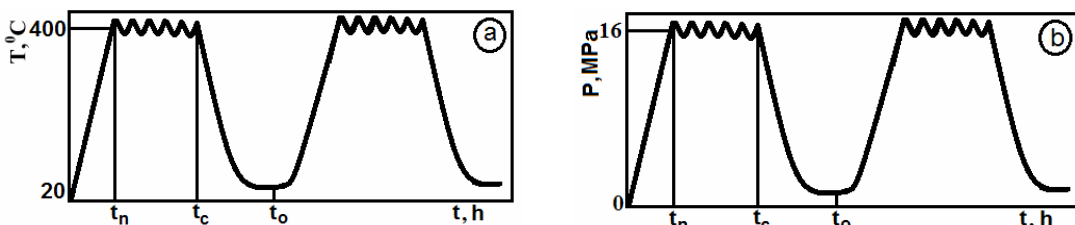


Рис. 3. Умови нестационарного температурного (а) та силового (б) навантаження.

Fig. 3. Unsteady conditions of temperature (a) and of power (b) load.

Встановлено, що максимальні локальні напруження виникають біля отвору на піку “вибірки” (т. А, на рис. 2 с). Змодельовано розподіл концентрації водню в околі такого концентратора напружень по товщині стінки барабана котла (рис. 4 а). Встановлено, що у верхній точці

“вибірки” (т. А, рис. 2 с) (на деякій відстані від внутрішньої поверхні барабана), концентрація водню на 40 % більша за її початкове значення і в 5 разів – за відповідне значення в околі зовнішньої поверхні барабана. Побудовано зміну міри пошкодженості по товщині вздовж “вибірки” (рис. 4 б), де локальні напруження є найбільші і найімовірніше виникають пошкодження.

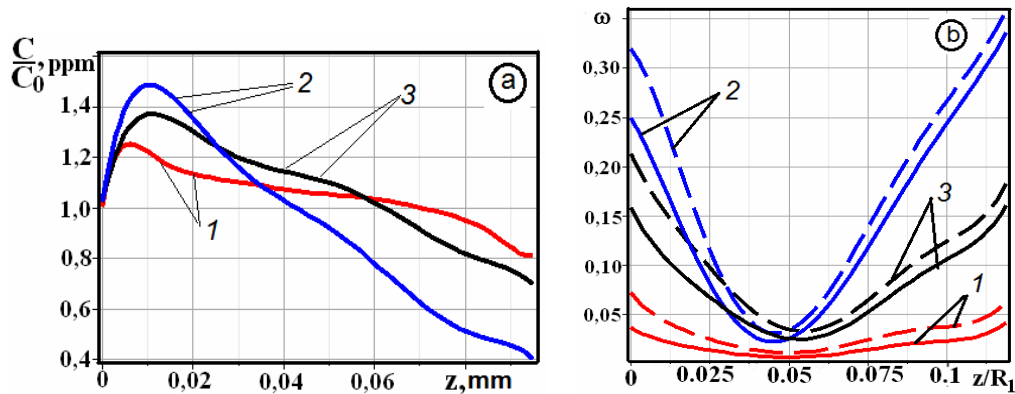


Рис. 4. Розподіл відносної концентрації водню ($C_0 = 4.08 ppm$) по товщині барабана, починаючи з вершини “вибірки” в околі концентратора, за сталої висоти “вибірки” h (а) та зміна міри пошкоджуваності (б) по товщині стінки колектора барабана в околі отвору на вершині “вибірки” на повітрі (суцільна лінія) та у водні (штрихова лінія): $l/2:h=1$ – лінія 1; $l/2:h=2$ – лінія 2; $l/2:h=3$ – лінія 3.

Fig. 4. The distribution of the relative concentration of hydrogen ($C_0 = 4.08 ppm$) on thickness hole with "fossa" in a neighborhood hub at constant height "holes" h (a) and changing degree damage (b) on the thickness of the wall of the drum in the vicinity of the hole on top of the "holes" in air (solid line) and hydrogen (dashed line): $l/2:h=1$ – 1 line; $l/2:h=2$ – line 2; $l/2:h=3$ – 3 line.

Встановили закономірність зміни параметра пошкоджуваності з часом експлуатації в околі концентратора напружень за різної форми “вибірок” у водні та на повітрі, в місці, де локальна енергія досягає найбільших значень і найімовірніше виникають пошкодження.

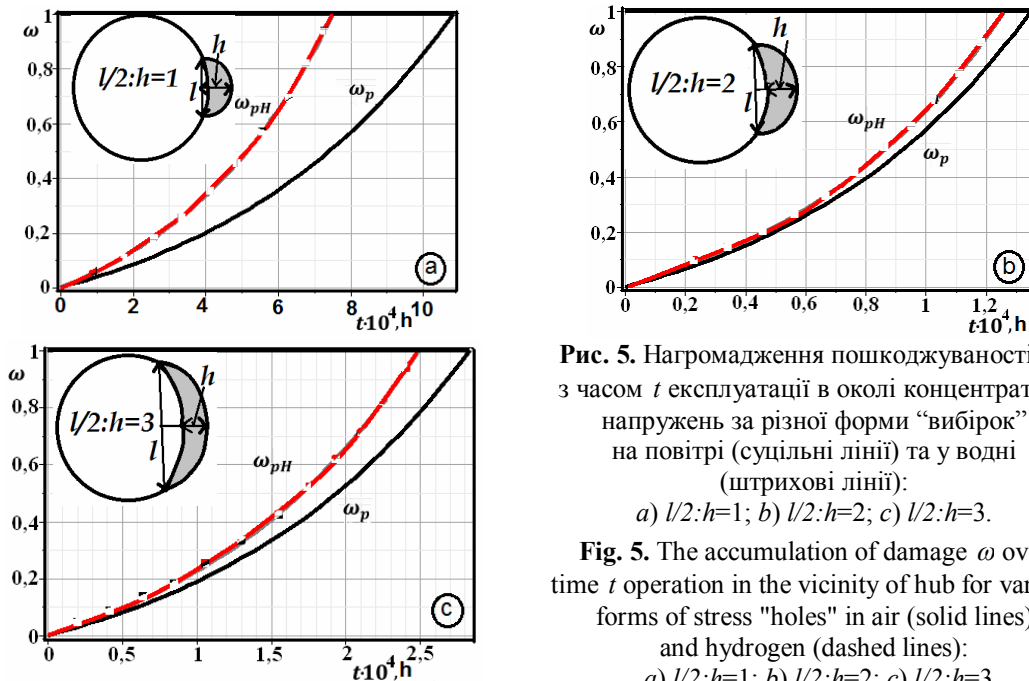


Рис. 5. Нагромадження пошкоджуваності ω з часом t експлуатації в околі концентратора напружень за різної форми “вибірок” на повітрі (суцільні лінії) та у водні (штрихові лінії): а) $l/2:h=1$; б) $l/2:h=2$; в) $l/2:h=3$.

Fig. 5. The accumulation of damage ω over time t operation in the vicinity of hub for various forms of stress "holes" in air (solid lines) and hydrogen (dashed lines): а) $l/2:h=1$; б) $l/2:h=2$; в) $l/2:h=3$.

Встановлено, що найоптимальнішою із досліджених нами “вибірок” є колова, оскільки довговічність за такої “вибірки” на 40% вища за “вибірки” еліптичних форм. Водень зменшує довговічність барабана для усіх форм “вибірки” за досліджуваного режиму навантаження до 30% (див. таблицю).

Таблиця. Кількість циклів до руйнування на повітрі та у водні за різного співвідношення малої півосі h до великої півосі $l/2$ “вибірки”

Table. The number of cycles to fracture in the air and hydrogen for different relation of small axis to semi-major axis h to $l/2$ "hole"

Співвідношення малої півосі h до великої півосі $l/2$ “вибірки”	Кількість циклів до руйнування без впливу водню	Кількість циклів до руйнування за впливу водню	Зменшення довговічності за дії водню, %
1/1	145	102	30
1/2	110	81	26
1/3	98	70	28

ВИСНОВКИ

Проведено оцінку циклічного ресурсу колектора барабана котла за критерієм граничного значення нагромадженої пошкоджуваності від дії всього спектру нестационарних режимів під час його експлуатації. Встановлено, що найбільша пошкоджуваність виникає в околі отворів на зовнішній поверхні колектора. Досліджено різні форми “вибірок” і встановлено, що максимальні локальні напруження виникають біля отвору на піку “вибірки”. Показано, що найоптимальнішою з досліджувальних форм “вибірки” є колова, оскільки довговічність за такої “вибірки” на 40 % більша порівняно з “вибірками” еліптичних форм. Водень зменшує до 30 % довговічність колектора барабана котла для усіх форм “вибірки” за досліджуваного режиму навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

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. – 56с.
2. Іваницький Я.Л., Гембара О.В., Чепіль О.Я. Оцінювання довговічності елементів енергетичного обладнання з урахуванням впливу експлуатаційного середовища // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – № 1. – С. 93-101.
3. Бойко В. Комп’ютерна програма “Програма розрахунку концентрації водню в плоских елементах конструкцій за дії силових навантажень” / В.М. Бойко, Я.Л. Іваницький, О.В. Гембара, О.Я. Чепіль // Свідectvo про реєстрацію авторського права на твір № 58212 видане Державною службою інтелектуальної власності України 22.01.2015 р.
4. Андрейків О.Є., Гембара О.В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
5. Stashchuk M., Dorosh M. Evaluation of hydrogen stresses in metal and redistribution of hydrogen around crack-like defects // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – 37. – P. 14687-14696.
6. Іваницький Я.Л., Муравський Л.І., Гембара О.В., Гвоздюк М.М., Половинко Т.І. Визначення енергії руйнування композиту з використанням методу цифрової спекл-кореляції // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 3. – С. 85-91.