

УДК 620.197.5: 669.788

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВОДНЮ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В УМОВАХ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ

FABING QIN<sup>1</sup>, О. В. ГЕМБАРА<sup>2,3</sup>, О. Я. ЧЕПІЛЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yangtze University, Jingzhou, China;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>3</sup> Національний університет "Львівська політехніка"

Виконано порівняльний аналіз результатів розрахунку довготривалої міцності за класичними рівняннями Качанова–Работнова та енергетичним підходом. Ці результати дають задовільну збіжність з експериментальними даними. Проте час до руйнування, отриманий за енергетичним підходом, має втричі меншу похибку.

**Ключові слова:** концентрація водню, повзучість, енергія деформування, пошкоджувальність, довготривала міцність.

Надійність і безпека тепломеханічного обладнання, особливо за тривалих напрацювань, забезпечуються як ефективністю системи експлуатаційного контролю металу, так і удосконаленням експериментально-аналітичних методів прогнозування залишкового ресурсу енергетичного обладнання [1–3]. Важливу роль під час оцінювання їх довговічності відіграє повзучість матеріалу з нагромадженням незворотної деформації і пошкодження, що призводить згодом до появи тріщини. Серед важливих чинників, які суттєво впливають на характеристики повзучості і довготривалої міцності, є робоче середовище, в якому знаходяться досліджувані елементи конструкцій. Одним з найагресивніших середовищ вважають водень і його інтенсифікувальний вплив на повзучість сталі розглянуто раніше [4].

Експерименти показують [5], що вплив водневмісного середовища на метал проявляється на макрорівні в зниженні його міцності і пластичності, а на мікрорівні у зародженні, розвитку і нагромадженні різноманітних пошкоджень (мікропор, суб- і мікродефектів, мікротріщин). Розвиток таких джерел водневої деградації пов'язаний як зі спрямованою дифузією атомарного водню в місця максимальних розтягувальних напружень, так і з взаємодією дифундуючого водню з наявними в об'ємі металу пастками водню – точковими, одно-, двовимірними і об'ємними дефектами кристалічної будови металу. Отже, зовнішнє середовище впливає на матеріал через дефекти, причому розвиток вже існуючих дефектів і зародження нових різко пришвидшується в умовах тривісного напруженого стану.

Нижче подано методику розрахунку міцності елементів конструкцій в умовах повзучості з врахуванням впливу водню на базі енергетичного підходу. Розроблене методичне та програмне забезпечення дає змогу оцінити накопичення пошкодженості й появу тріщини. При цьому вихідними даними для розрахунків є результати випробувань гладких зразків (криві повзучості), що відомі для більшості матеріалів за різних температур. Накопичення пошкодженості в умовах впливу водню описують двома способами: класичними рівняннями Качанова–Ра-

ботнова [6] з двома параметрами (пошкоджуваність та концентрація водню) та за енергетичним підходом [7].

**Класичні підходи розрахунку довговічності тривало експлуатованого обладнання.** Під час дослідження тривалої міцності елементів конструкцій за одночасної дії на них механічного навантаження і агресивного середовища необхідно розглядати рівняння дифузії разом з кінетичним рівнянням, в яке входить параметр пошкоджуваності  $\omega$ , що характеризує зміну площі поперечного перерізу зразка під час руйнування в умовах повзучості [6]. Під повзучістю розуміють непружну деформацію, яка збільшується з часом під дією постійного напруження за сталої температури. Час, упродовж якого необхідно утримувати навантаження для повного руйнування зразка, називається часом до руйнування.

Класичне кінетичне рівняння для ізотропної пошкоджуваності, запропоноване Ю. М. Работновим та Л. М. Качановим [6], має вигляд

$$\frac{d\omega}{dt} = A \left( \frac{\sigma}{1-\omega} \right)^n, \quad \omega|_{t=0} = 0, \quad (1)$$

де  $t$  – час,  $\sigma$  – стале прикладене навантаження.

За критерій руйнування приймають умову:  $\omega|_{t=t_*} = 1$ . Коли параметр пошкоджуваності  $\omega$  досягає одиниці в деякій точці елемента конструкції, то в цьому місці відбувається руйнування.

Для врахування впливу водневмісного середовища у кінетичній теорії Качанова–Работнова як другий структурний параметр вводять концентрацію водню  $C_H(t)$  [6]. Тоді кінетичне рівняння пошкоджуваності набуває вигляду

$$\frac{d\omega}{dt} = A \left( \frac{\sigma_{eq}}{1-\omega} \right)^n f(C_H(t)), \quad \omega|_{t=0} = 0, \quad \omega|_{t=t_*} = 1, \quad (2)$$

де  $f(C_H(t))$  – зростаюча функція, яка задовольняє умову  $f(C_H = 0) = 1$ .

Як залежність  $f(C_H(t))$  з однією матеріальною константою розглядають [5] лінійну або експоненціальну функції

$$f(C_H(t)) = 1 + aC_H(t), \quad f(C_H(t)) = \exp(aC_H(t)). \quad (3)$$

Основним напрямком розвитку континуальної теорії пошкоджуваності є уточнення визначальних співвідношень виду (1) із накопиченням експериментальних результатів. Часто це призводить до збільшення кількості структурних параметрів і складності одержуваних рівнянь пошкоджуваності. На жаль, перевірити правильність тієї чи іншої моделі пошкоджуваності неможливо. Можна тільки сказати, наскільки добре модель наближує деякий набір експериментальних результатів. Конкретний вид функції в співвідношенні (1) вибирають виключно з міркувань найкращого опису конкретних експериментальних результатів за допомогою визначальних параметрів: навантаження, температури, пошкоджуваності, деформації повзучості тощо.

**Енергетичний підхід.** Запропоновано [8] енергетичний підхід для моделювання довговічності металів в умовах складного напруженого стану. Численні експериментальні дослідження на різних матеріалах за різних температур, детальний аналіз яких подано раніше [6], показали хорошу відповідність експериментальних і теоретичних кривих повзучості аж до моменту руйнування.

Для опису руйнування в матеріалі вводять критерій, який базується на енергетичному підході накопичення пошкоджуваності в локальному елементі моделі.

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

$$\omega = W(x, y, z, t) / W_C^H, \quad (4)$$

де  $W(x, y, z, t) = \int_0^t \sigma_{eq}(x, y, z, \tau) \dot{p}(x, y, z, \tau) d\tau$  – поточне значення енергії деформування;  $W_C^H$  – її критичне значення з урахуванням впливу водневмісного середовища;  $\sigma_{eq}$ ,  $p$  – еквівалентні напруження та деформації повзучості локального об'єму елемента, які залежать від механічних навантажень, температурного поля і концентрації водню:

$$p(x, y, z, t) = p_p(x, y, z, t) + p_T(x, y, z, t, T) + p_H(x, y, z, t, C_H(\sigma_h, T)). \quad (5)$$

Вважаємо, що якщо  $\omega(x, y, z, t) < 1$ , то локальний елемент моделі незруйнований. Час руйнування  $t = t_*$  елемента визначаємо з умови  $\omega(x, y, z, t_*) = 1$ . Руйнування елемента об'єму матеріалу відбувається в результаті руйнування всіх локальних елементів.

Запропонований критерій дає змогу достовірно описати складний процес нагромадження пошкоджень матеріалу, не накладаючи додаткових гіпотез на закони нагромадження пошкодження в локальному елементі.

Для визначення константи  $W_C^H$  необхідно мати серію кривих стаціонарної одновісної повзучості з початковою ділянкою третьої стадії за декількох значень  $\sigma = \text{const}$  в пружній області роботи матеріалу [8]. На цих кривих визначаємо точки  $(p_*, t_*)$ , які відповідають межі між другою і третьою стадіями повзучості. І саме з цього моменту часу починається послідовне руйнування локальних елементів, що і є причиною появи третьої стадії на кривій повзучості. Тому величину  $W$ , яка є нагромадженою енергією в цьому елементі до моменту часу  $t = t_*$ , що відповідає початку третьої стадії повзучості, і приймаємо за критичну величину  $W_C^H$ .

Концентрацію водню у матеріалі визначаємо із задачі дифузії водню з урахуванням поля механічних напружень [9–11].

**Алгоритм розрахунку конструктивних елементів, на які впливають водень високих параметрів і неоднорідні теплові поля [12]:**

1. Побудова геометричної моделі конструктивного елемента. Якщо в задачі можна виявити симетрію, то будується фрагмент конструктивного елемента для зменшення кількості скінченних елементів.

2. Побудова скінченно-елементної моделі на основі геометричної моделі. Що менший розмір скінченних елементів (тобто що гущіша сітка), то точніше скінченно-елементна модель буде відповідати геометричній моделі. На локальних ділянках необхідне додаткове подрібнення сітки для отримання точніших результатів.

3. Прикладення зовнішніх навантажень, тобто температури, тиску водневмісного середовища, що створює напружений стан, і тиску водню, який безпосередньо впливає на швидкість хімічних перетворень. Першу складову задають у вигляді навантаження в механічній задачі, а другу – використовують для обчислення розподілу концентрації водню.

4. Визначення температурного поля  $T(x, y, z, t)$ .

5. Розрахунок початкового напруженого стану  $\{\sigma_{ij}\}$  конструктивного елемента, де пластичних деформацій немає. Тоді в початковий момент часу ( $t = 0$ ) виникають тільки пружні деформації

$$e_{ij}(x, y, z) = \sigma_{ij}(x, y, z) / E. \quad (6)$$

6. Визначення розподілу концентрації водню за об'ємом конструктивного елемента з урахуванням температурного поля і механічних напружень. За знайденими значеннями  $\{\sigma_{ij}\}$  у кожний момент часу  $t = t_{i+1}$  обчислюємо гідростатичні напруження:

$$\sigma_h = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3. \quad (7)$$

Розподіл концентрації водню біля концентратора напружень обчислюємо на основі розв'язку рівняння Фіка, яке враховує вплив градієнта механічних напружень на дифузію водню у зоні передруйнування [9]:

$$\frac{\partial C_H}{\partial t} = \bar{\nabla} (D \bar{\nabla} C_H) - \bar{\nabla} \left( \frac{D V_H C_H}{RT} \bar{\nabla} \sigma_h \right), \quad (8)$$

де  $C_H = C_H(x, y, z, t)$  – концентрація водню;  $\bar{\nabla} = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$  – оператор Гамільтона;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – абсолютна температура;  $V_H$  – парціальний молярний об'єм водню в металі;  $\sigma_h$  – гідростатична компонента тензора напружень у металі;  $t$  – час.

Крайові та початкові умови приймаємо відповідно до умов наводнювання.

7. Встановлення приросту кроку з часом  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) на величину, яку визначаємо на основі мінімальної допустимої похибки, і розрахунок нового напружено-деформованого стану.

Швидкість повзучості приймаємо у вигляді функції, граничний вид якої при  $C_H \rightarrow 0$  збігається зі стандартним степеневим законом повзучості [6]

$$\frac{\partial p_{ij}}{\partial t} = B \sigma_{eq}^m (1 + a C_H), \quad (9)$$

де параметри  $B$ ,  $m$  характеризують повзучість на повітрі, а параметр  $a$  відображає вплив середовища на швидкість деформацій повзучості;  $\sigma_{eq}$  – еквівалентні напруження.

8. Визначення параметра пошкоджуваності в кожному скінченному елементі на даному часовому кроці за формулою (2) та (4).

9. Повторення розрахунків для нових часових кроків з іншими значеннями коефіцієнтів до досягнення параметром пошкоджуваності граничного значення в будь-якому скінченному елементі конструкції. При цьому як початковий напружений стан для подальшого кроку навантаження використовують результати, отримані на попередньому кроці.

**Результати розрахунку та порівняльний аналіз.** Під час створення конструкцій, які працюють тривалий час за високих температур, проєктанти намагаються зменшити їх масу шляхом використання тонкостінних елементів. У зв'язку з неможливістю застосування характеристик повзучості і тривалої міцності, отриманих за стандартних випробувань, для розрахунків тонкостінних елементів конструкцій досліджують вплив товщини зразків на характеристики повзучості і тривалої міцності. Аналіз результатів експериментальних досліджень [6] показав, що зміна товщини стінки зразка до 1 mm практично не впливає на характеристики повзучості і тривалої міцності. Тому вивчали поведінку плоского дискового зразка з боковим надрізом, виготовленого зі сталі 20 товщиною 2 mm (рис. 1), за дії водневмісного середовища та постійного силового і теплового навантаження.

Відомо, що в певному інтервалі довжин тріщин у такому зразку напружений стан матеріалу в околі її вершини не залежить від довжини тріщини і за умови сталого навантаження не змінюється під час росту тріщини. Це дає можливість дослідити вплив водню на деформування за незмінного силового параметра в зоні передруйнування.

Зразок зі сталі 20 з вирощеною втомною тріщиною наводнювали у спеціальній камері упродовж 4 h за температури 400°C та тиску водню 10 atm. Далі зразок встановлювали у захвати та поміщали у камеру з температурою 300°C та тиском 10 atm. Через систему важелів навантажували зразок зусиллями  $0,76\sigma_B$  ( $0,84\sigma_B$ ;  $0,87\sigma_B$ ). Під час експерименту через віконце камери за допомогою цифрової фотокамери фотографували поверхню зразка перед вершиною тріщини. Далі, використовуючи метод цифрової кореляції зображень [13], визначали переміщення точок поверхні перед вершиною тріщини і розраховували деформації у цій зоні. Це дало можливість побудувати діаграми повзучості в координатах “деформація–час” для відповідних навантажень. Довівши зразок до руйнування за встановлених навантажень, температури та тиску водню, будували діаграми довготривалої міцності.

Скінченно-елементна модель дискового зразка включає 93574 елементів тетраєдоподібної форми. В околі концентратора напружень сітку згущували. Розрахунки здійснювали для сталі 20 за таких вхідних даних:  $D = 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ,  $V_H = 1,96 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ,  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $E = 1,98\cdot 10^5 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_T = 330 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_B = 520 \text{ МПа}$ ;  $S_i = 1350 \text{ МПа}$ ; радіус вершини тріщини  $\rho = 0,05 \text{ mm}$ .

Константи кінетичних рівнянь повзучості та довготривалої міцності сталі 20 отримано шляхом обробки наведених у праці [14] кривих повзучості та довготривалої міцності. Коефіцієнти для сталі 20 такі:  $A = 3,069\cdot 10^{-24} \text{ МПа}^{-n}/\text{s}$ ,  $B = 6,65\cdot 10^{-14} \text{ МПа}^{-m}/\text{s}$ ,  $n = 6,67$ ,  $m = 4,3$ ,  $a = 1,19\cdot 10^3 \text{ ppm}^{-1}$  [15].

Параметр пошкоджуваності визначали за двома підходами: кінетичним рівнянням Качанова–Работнова (2) та енергетичним підходом (4).

Основні результати розрахунків і випробувань подано на рис. 2–4.

Час до руйнування:  $t_1$  – розрахований за кінетичним рівнянням Качанова–Работнова (2);  $t_2$  – за енергетичним підходом (4);  $t_*$  – експериментально встановлений – поданий у табл. 1.

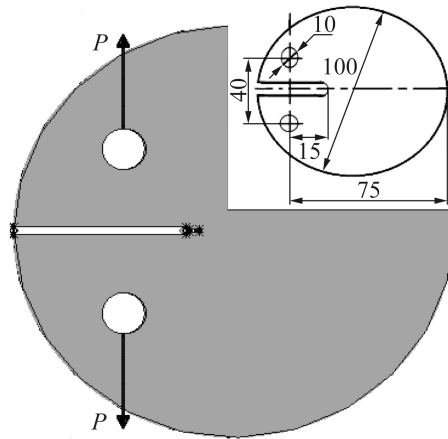


Рис. 1. Схема дискового зразка з боковим надрізом.

Fig. 1. Scheme of a disk specimen with an edge notch.

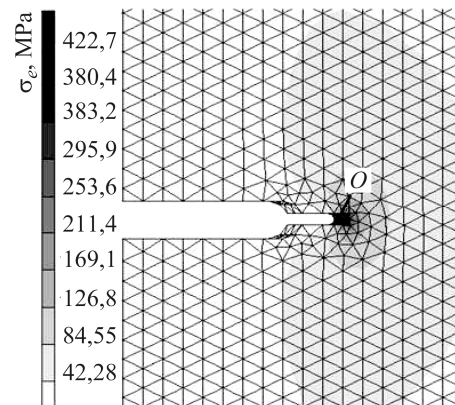


Рис. 2. Розподіл еквівалентних напружень  $\sigma_e$  у зоні передруйнування в околі тріщини за досягнення навантаження  $0,76\sigma_B$ .

Fig. 2. Distribution of equivalent stresses,  $\sigma_e$ , in the prefracture area in the vicinity of a crack at reaching load  $0,76\sigma_B$ .

Таблиця 1

Рівень навантаження	$t_1, h$	$t_2, h$	$t_*, h$
$0,76\sigma_B$	248	219	210
$0,84\sigma_B$	167	158	155
$0,87\sigma_B$	138	127	125

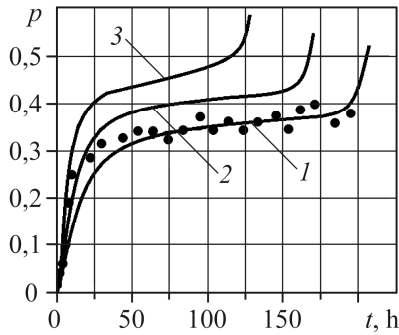


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Криві повзучості сталі 20 в околі точки  $O$  (див. рис. 2) зони передруйнування за  $T = 300^\circ\text{C}$ : криві – розрахунок (1 –  $0,76\sigma_B$ ; 2 –  $0,84\sigma_B$ ; 3 –  $0,87\sigma_B$ ), кружечки – експериментальні результати.

Fig. 3. Creep curves of steel 20 at a point  $O$  (see Fig. 2) of the prefracture area at  $T = 300^\circ\text{C}$ : curves – calculation (1 –  $0,76\sigma_B$ ; 2 –  $0,84\sigma_B$ ; 3 –  $0,87\sigma_B$ ), circles – experimental data.

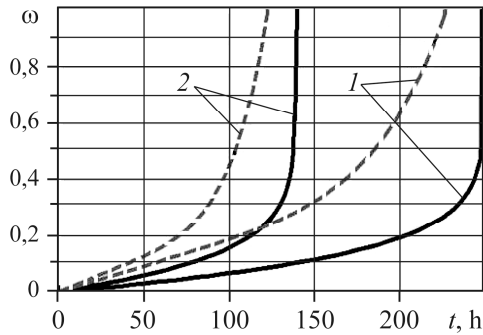


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Залежність параметра пошкоджуваності  $\omega$  від часу, визначена в околі точки  $O$  (див. рис. 2) за класичним кінетичним рівнянням Качанова–Работнова (2) (суцільні лінії) та енергетичним підходом (4) (штрихові): 1 –  $0,76\sigma_B$ ; 2 –  $0,87\sigma_B$ .

Fig. 4. Dependence damage parameter  $\omega$  with time determined at the point  $O$  by the classical kinetic equation Kachanov–Rabotnov (2) (solid lines) and energy approach (4) (dashed): 1 –  $0,76\sigma_B$ ; 2 –  $0,87\sigma_B$ .

Для порівняння результатів розрахунків часу до руйнування за кінетичним рівнянням Качанова–Работнова (2) та енергетичним підходом (4) обчислили абсолютні похибки розрахункових даних від експериментальних за формулами

$$\Delta_1 = \left| \frac{t_* - t_1}{t_1} \right|, \quad \Delta_2 = \left| \frac{t_* - t_2}{t_2} \right|, \quad (10)$$

де  $\Delta_1$  – абсолютна похибка за класичним рівнянням Качанова–Работнова;  $\Delta_2$  – за енергетичним підходом.

Таблиця 2

Рівень навантаження	$\Delta_1, \%$	$\Delta_2, \%$
$0,76\sigma_B$	15,32	4,1
$0,84\sigma_B$	7,19	1,9
$0,87\sigma_B$	9,42	1,57

при визначенні трьох констант. Використання ж класичних кінетичних рівнянь Качанова–Работнова вимагає встановлення ще додаткових трьох коефіцієнтів.

Результати розрахунків, отримані за двома підходами, дають задовільну збіжність з експериментальними даними. Проте час до руйнування, розрахований за енергетичним підходом, має втричі меншу похибку (табл. 2). Крім того, щоб прогнозувати довготривалу міцність за цим підходом, достатньо мати результати тільки для повзучості

Отже, запропонована методика розрахунку міцності елементів конструкцій в умовах повзучості з врахуванням впливу водню на базі енергетичного підходу, дозволяє описати всі стадії сповільненого руйнування матеріалів під впливом водневмісного середовища за статичного постійного навантаження.

## ВИСНОВКИ

Застосовуючи енергетичний підхід, запропонували методику для оцінки міцності та довговічності елементів конструкцій в умовах повзучості з врахуванням впливу водню. В основу методики покладено зв'язану задачу дифузії водню та термов'язкопружнопластичності з врахуванням пошкоджуваності матеріалу за повзучості. За міру енергетичної пошкоджуваності прийнято відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму до її критичного значення.

Для прикладу визначено напружено-деформований стан в зоні передруйнування в околі вершини тріщини у дисковому плоскому зразку з боковим надрізом з врахуванням сумісної дії чинників, які впливають на його міцність і довговічність: температура, деформації повзучості, водень та накопичення пошкоджуваності. Параметр пошкоджуваності визначали за двома підходами: за класичним кінетичним рівнянням Качанова–Работнова (2) та розвиненим у цій праці енергетичним підходом (4). Результати розрахунків показали задовільний збіг з даними, отриманими експериментально на модельному зразку.

*РЕЗЮМЕ.* Проведен сравнительный анализ результатов расчета длительной прочности по классическим уравнениям Качанова–Работнова и энергетическим подходом. Эти результаты дают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными. Однако время до разрушения, рассчитанное энергетическим подходом, имеет меньшую в 3 раза погрешность.

*SUMMARY.* A comparative analysis of the results of calculating the long-term strength according to the classical Kachanov–Rabotnov equations and the energy approach is carried out. These results give satisfactory convergence with experimental data. However, the time to fracture, calculated by the energy approach gives 3 times less error.

1. *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.*)
2. *Дробенко Б., Бурик О. Математичне моделювання процесів деформування елементів конструкцій за термосилового навантаження // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. – 2014. – Вип. 20. – С. 117–126.*
3. *Похмурський А. Ю., Русин Б. П., Обух Ю. В. Оцінювання впливу пітінгоподібних дефектів на міцність тонколистового сплаву Д16Т // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 1. – С. 95–99.*  
(*Pokhmurs'kyi A. Yu., Rusyn B. P., and Obukh Yu. V. Evaluation of the influence of pit-like defects on the strength of D16T sheet alloy // Materials Science. – 2012. – 48, № 1. – P. 101–105.*)
4. *Повзучість у водні експлуатованої сталі 2,25Cr–Mo / Л. О. Бабій, О. З. Студент, А. Загурський, А. Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – № 5. – С. 91–96.*  
(*Creep of degraded 2.25Cr–Mo steel in hydrogen / L. O. Babii, O. Z. Student, A. Zagorski, A. D. Markov // Materials Science. – 2007. – 43, № 5. – P. 701–707.*)
5. *Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування та довговічність металічних матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.*
6. *Локощенко А. М. Ползучесть и длительная прочность металлов. – М.: Физматлит, 2015. – 496 с.*

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. Радченко В. П., Небогина Е. В., Андреева Е. А. Структурная модель разупрочняющегося при ползучести материала в условиях сложного напряженного состояния // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2009. – № 1. – С. 75–84.
9. 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.
10. 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.  
(*Influence of the stress-strain state on the distribution of hydrogen concentration in the process zone / V. V. Panasyuk, Ya. L. Ivanyts'kyi, O. V. Hembara, V. M. Boiko // Materials Science. – 2014. – 50, № 3. – P. 315–323.*)
11. Stashchuk M. and Dorosh M. Evaluation of hydrogen stresses in metal and redistribution of hydrogen around crack-like defects // Int. of Hydrogen Energy. – 2012. – **37**. – P. 14687–14696.
12. Бубнов С. А., Овчинников И. И. Моделирование ползучести и разрушения неравномерно прогретого толстостенного трубопровода в условиях высокотемпературной водородной коррозии // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2011. – № 4. – С. 67–74.
13. Hydrogen influence on fracture of sheet carbon steel / Y. Ivanytskyj, S. Shtayura, Y. Molkov, T. Lenkovskiy // Int. J. Fracture. – 2012. – **176**, № 1. – P. 17–23.
14. 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.
15. Особенности проявления водородной хрупкости в углеродистых сталях / В. И. Большаков, Л. Н. Дейнеко, А. М. Нестеренко, В. И. Школа // Матеріали V Міжнар. конф. “ВОМ-2007” (Донецьк, 21–25 травня 2007 р.). – Донецьк, 2007. – Т. 2. – С. 861–865.

Одержано 13.06.2017