

УДК 620.197.5: 669.788

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВОДНЮ НА НАГРОМАДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У СТАЛЯХ ЗА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ

JIANG QIONGQIN<sup>1</sup>, О. В. ГЕМБАРА<sup>2,3</sup>, О. Я. ЧЕПІЛЬ<sup>2,3</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"

За розробленою математичною моделлю та програмним модулем оцінено нагромадження пошкоджень з урахуванням дифузії водню. Процес змодельовано за двома підходами: рівняннями Качанова–Работнова–Локошенка з двома параметрами (пошкодження та концентрація водню) та енергетичним. Для цього використано зразок Бріджмена з урахуванням і без впливу водню. Результати розрахунків, отримані за двома підходами, задовільно збігаються з експериментальними. Проте енергетичний підхід дає вдвічі меншу похибку.

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

**Вступ.** Найскладніше під час оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій визначити домінуючий механізм пошкодження і його вплив на формування технічного стану об'єкта. Це особливо актуально для тривало експлуатованого обладнання. Тому сьогодні виконують численні дослідження, спрямовані на розробку єдиного і найбільш узагальненого критерію граничного стану, на основі якого залишковий ресурс вдасться спрогнозувати з високою точністю і за короткий проміжок часу.

Для вирішення цього завдання запропоновано концепцію пошкодження [1, 2], в основі якої припущення, що нагромадження пошкоджень матеріалом об'єкта відбувається безперервно і є результатом сукупного впливу декількох експлуатаційних чинників. Отже, технічний стан матеріалу такого об'єкта в будь-який момент часу можна виразити через критерій пошкодження і оцінити залишковий ресурс обладнання на основі результатів досліджень динаміки нагромадження пошкоджень.

У технологічних процесах як агресивне часто використовують воденьмісне середовище, причому нерідко воно діє за високих тиску і температур. У таких умовах водень, проникаючи в матеріал конструкцій, хімічно взаємодіє з ним, змінюючи його механічні характеристики [3, 4]. Цей процес супроводжується повзучістю і нагромадженням пошкоджень. Крім того, через локальне прогрівання окремих зон конструкцій або нерівномірне перерізу конструкційного елемента фізико-хімічна взаємодія водню з матеріалом по об'єму конструкцій неоднорідна, що зумовлює значний градієнт і механічних характеристик, і температурного поля, і поля пошкоджень та деформацій [5–10]. Спрогнозувати поведінку конструкцій у часі з визначенням їх довговічності за постійних або змінних умов експлуатації вельми складно, оскільки необхідно моделювати перебіг різних процесів,

---

Контактна особа: О. В. ГЕМБАРА, e-mail: hembra@ipm.lviv.ua

які відбуваються з різною швидкістю в різних точках об'єму конструкції, що вимагає розробки спеціальних алгоритмів.

**Побудова моделі деформування і руйнування матеріалів, підданих наводнюванню.** Тут слід враховувати такі ефекти взаємодії конструкцій з воднем [3]:

– водень проникає в конструкцію за механізмом активованої дифузії, причому дифундує в зони розтягування матеріалу, тобто напружений стан впливає на кінетику наводнювання;

– водень, що проникає в матеріал, знижує його міцність і пластичність, причому зміна механічних властивостей залежить від його концентрації і не залежить від виду наводнювання.

Для дослідження деформування і руйнування конструкцій, підданих наводнюванню, використано підхід, який розглядає систему моделей [11]: дифузії водню, деформування матеріалу, настання граничного стану, конструкційного елемента.

Подано методику розрахунку міцності елементів конструкцій в умовах повзучості з урахуванням впливу водню. Для опису нагромадження пошкоджень використано класичні рівняння Качанова–Работнова [1, 2] та енергетичний підхід [4].

Розроблене методичне та програмне забезпечення дає можливість оцінити нагромадження пошкоджень та появу тріщини. При цьому вхідними для розрахунків є результати випробувань гладких зразків (криві повзучості), що відомі для більшості матеріалів за різних температур.

**Модель дифузії водню в матеріалі конструкції.** Кінетику проникнення водню в матеріал конструкції описуємо рівнянням дифузії виду [12]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \bar{\nabla} (D \bar{\nabla} C) - \bar{\nabla} \left( \frac{DV_H C}{RT} \bar{\nabla} \sigma_h \right), \quad (1)$$

де  $C = C(x, y, z, t)$  – концентрація водню;  $\bar{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$  – 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:  $\sigma_h = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ ;  $t$  – час. Крайові та початкові умови приймаємо згідно з режимами наводнювання.

**Модель деформування та уповільненого руйнування металів у водні.** Під уповільненим руйнуванням конструкцій в умовах водневого впливу розуміємо нагромадження пошкоджень, кінетика якого залежить від схеми напруженого стану і концентрації водню.

Для його опису живають різні підходи: Л. М. Качанова [1], Ю. Н. Работнова [2], засновані відповідно на використанні параметра суцільності  $\psi$  або параметра пошкодження  $\Pi$ , чи А. Р. Ржаніцина, що ґрунтується на понятті миттєвої міцності матеріалу  $R$  [11]. Для врахування впливу водню є два шляхи. У першому випадку під час розрахунків можна користуватись вже відомими формулами Качанова–Работнова [1, 2], але при цьому вважати, що сталі матеріалу залежать не тільки від температури, а й від концентрації водню. Цей метод незручний, бо під час обчислень довговічності потрібно мати значення багатьох сталих матеріалу, які визначають експериментально, що досить дорого.

Другий шлях запропоновано в працях А. М. Локощенка [13, 14], де, щоб врахувати вплив водню, у кінетичній теорії Качанова–Работнова як другий структурний параметр вводять його концентрацію  $C(t)$ . Тоді кінетичні рівняння Качанова–Работнова записують так [13]:

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^{cr}}{dt} = \frac{3}{2} A \left( \frac{\sigma_{eq}}{1-\omega} \right)^n \frac{S_{ij}}{\sigma_{eq}} t^m f_1 \left( \frac{C}{C_0}, t \right), \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = B \frac{\sigma_{ru}^\chi}{(1+\phi)(1-\omega)^\phi} t^m f_2 \left( \frac{C}{C_0}, t \right), \quad (3)$$

$$\sigma_{ru} = \beta \sigma_1 + (1-\beta) \sigma_{eq},$$

де  $\sigma_{eq}$  – еквівалентні напруження;  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$  – швидкість деформацій повзучості локального об'єму елемента;  $S_{ij}$  – компоненти девіаторних напружень;  $\sigma_1, \sigma_{ru}$  – максимальні головні і розривні напруження;  $\omega$  – міра пошкодження, яка характеризує відносний об'єм нагромаджених у тілі пошкод;  $C$  – концентрація водню;  $C_0$  – початкове її значення; сталі матеріалу  $A, B, n, m, \chi, \phi, \beta$  залежать тільки від температур.

Найпростіший вигляд функцій  $f_i(C/C_0, t)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) такий [14]:

$$f_i(C/C_0, t) = 1 + a_i C(t)/C_0. \quad (4)$$

Тут значення  $a_i$  визначають експериментально і вони залежать і від температури, і концентрації водню.

Нижче пропонуємо енергетичну модель нагромадження пошкоджень [15, 16], придатну для оцінювання як стаціонарного, так і нестаціонарного напружених станів.

Руйнування в матеріалі описуємо критерієм руйнування локального елемента моделі, який базується на енергетичному підході нагромадження пошкоджень у локальному об'ємі. За міру енергетичного пошкодження  $\omega$  вважаємо відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму до її критичного значення у водні  $W_C^H$ :

$$\omega = W(x, y, z, t) / W_C^H, \quad (5)$$

де  $W(x, y, z, t) = \int_0^t \sigma_{eq}(x, y, z, \tau) \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}(x, y, z, \tau) d\tau$  – поточне значення енергії деформування.

Запропонований підхід для визначення параметра  $\omega$  дає змогу достовірно описати нагромадження пошкоджень матеріалу, не накладаючи додаткових гіпотез на закони їх накопичення в локальному об'ємі.

**Модель досягнення граничного стану.** Найчастіше вважають, що до прикладення навантаження матеріал є бездефектним, тобто  $\omega|_{t=0} = 0$ . Як критерій руйнування вибираємо умову

$$\omega(x, y, z, t_*) = 1, \quad (6)$$

з якої визначаємо час до руйнування зразка  $t_*$ .

**Скінченно-елементне моделювання повзучості та нагромадження пошкоджень.** Розрахунки виконували для зразка Бріджмена зі сталі 0,5Cr0,5Mo0,25V за температури  $T = 640^\circ\text{C}$  і навантаження  $P = 40; 54$  і  $75$  МПа.

Для розв'язування системи рівнянь (1)–(4) використовували метод скінченних елементів. За фактичними параметрами зразка Бріджмена побудували геометричну модель (рис. 1a). Крім того, через симетрію зразка можна не розглядати повністю тривимірну модель досліджуваного об'єкта, а моделювати лише один його фрагмент (рис. 1b). При цьому скінченно-елементна модель містила

15120 елементів паралелепіпедоподібної форми (рис. 1с). В околі концентратора напружень сітку згущували.

На першому етапі з тривимірної задачі пружно-пластичного деформування визначали початковий розподіл напружень і деформацій. Далі у кожний момент часу  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) – концентрацію водню з рівняння дифузії (1), деформації повзучості (2) та параметр пошкодження в кожному вузлі розбиття на скінченні елементи, який розраховували за кінетичним рівнянням Качанова–Работнова–Локощенка (3) та енергетичним підходом (5). Приріст кроку за часом встановлювали на основі мінімально допустимої похибки. Розрахунки на нових часових кроках з новими значеннями коефіцієнтів повторювали до досягнення параметром пошкодження граничного значення в будь-якому скінченному елементі конструкції. При цьому як початкові для подальшого кроку навантаження застосовували дані, отримані на попередньому кроці.

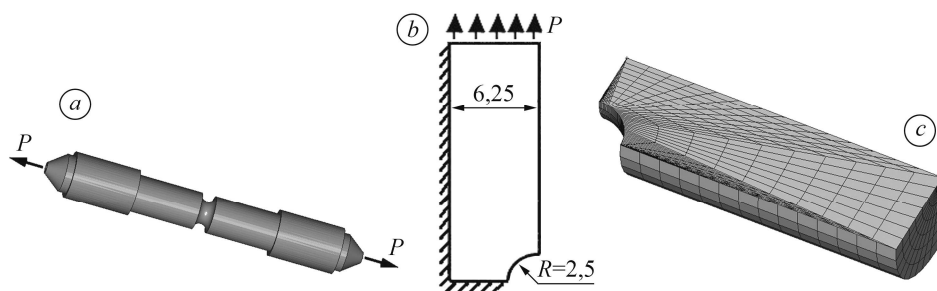


Рис. 1. Зовнішній вигляд зразка Бріджмена (а), розрахункова схема (b) та скінченно-елементне розбиття (с).

Fig. 1. External view of the Bridgman sample (a), computation chart (b) and the finite-element partitioning (c).

Для вирішення поставленого завдання в програмне забезпечення MSC Marc Mentat 2014, з допомогою якого моделювали поведінку складних матеріалів, вбудували модуль для розв'язування задачі дифузії (1) та обчислення параметра  $\omega$  за співвідношеннями (3) та (5).

Спочатку апробували модель і програмний комплекс, щоб спрогнозувати нагромадження пошкоджень у зразку Бріджмена у повітрі. Результати аналогічних досліджень зі застосуванням підходу Работнова–Качанова відомі [17, 18]. Використовуючи константи кінетичних рівнянь повзучості та довготривалої міцності для сталі 0,5Cr0,5Mo0,25V ( $A = 2,027 \cdot 10^{-16}$  МПа $^{-n}$ /s;  $B = 1,085 \cdot 10^{-14}$  МПа $^{-n}$ /s;  $n = 6,23$ ;  $m = 0$ ;  $\chi = 5,8383$ ;  $\phi = 3,0937$ ;  $\beta = 0,3$ ;  $a = 7,19$ ), обчислили зміну деформацій повзучості з часом для трьох рівнів навантажень (рис. 2) і порівняли з відповідними експериментальними та розрахунковими результатами [17, 18]. Далі побудували (рис. 3) часові залежності параметра  $\omega$  за кінетичним рівнянням Качанова–Работнова (3) та енергетичним підходом (5), і порівняли з експериментальними даними [18]. Виявили, що одержані результати задовільно корелюють із літературними.

Далі досліджували наводнені зразки. Вважали, що у результаті наводнювання в зразку встановилася рівномірно розподілена концентрація водню  $C_0 = 2$  ppm. Коефіцієнт  $a$ , який характеризує вплив воденьвмісного середовища, отримали шляхом оброблення експериментальних кривих повзучості та довготривалої міцності цієї сталі [13].

Для визначення перерозподілу концентрації водню у зразку під час навантаження використовували такі характеристики для досліджуваної сталі:  $D = 10^{-10}$  м $^2$ /s,  $R = 8,31$  J/(mol·K),  $V_H = 1,96$  cm $^3$ /mol,  $T = 640^\circ\text{C}$ .

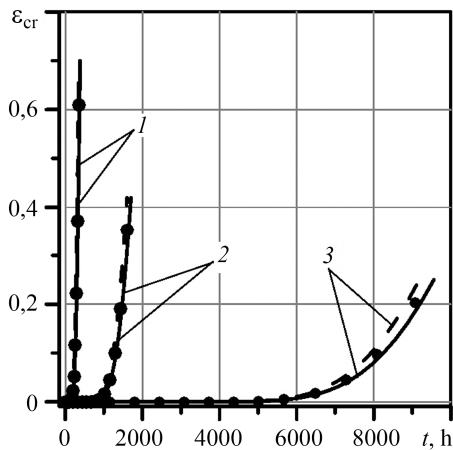


Рис. 2. Криві деформацій повзучості, побудовані за розробленою програмою (штрихові лінії), отримані у працях [17, 18] (суцільні) та експериментально (●) для трьох рівнів навантаження: 1 – 75 МПа; 2 – 54; 3 – 40.

Fig. 2. Creep deformation curves were constructed according by developed program (dashed lines) obtained in [17, 18] (solid) and experimental (●) for three load levels: 1 – 75 МПа; 2 – 54; 3 – 40.

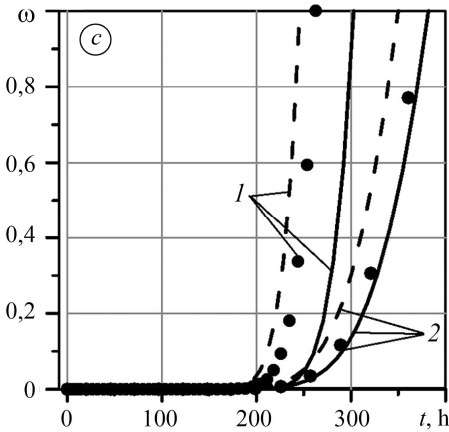
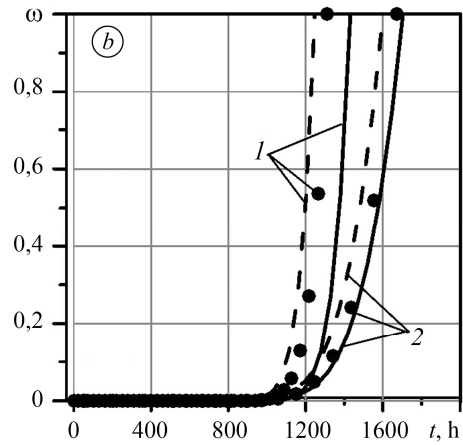
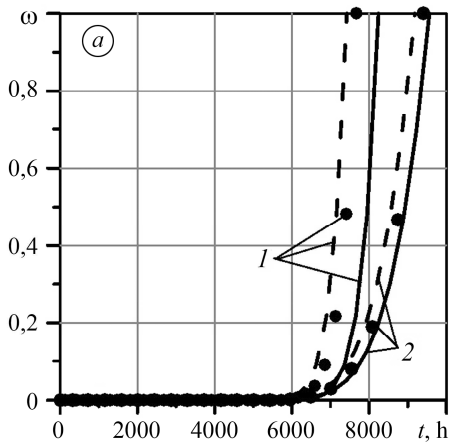


Рис. 3. Залежність параметра пошкодження  $\omega$  від часу у водні (1) та повітрі (2), побудована за розробленою програмою (штрихові криві), отримана у працях [17, 18] (суцільні) та експериментально (●) для навантаження 75 МПа (а); 54 (b) та 40 (c).

Fig. 3. Dependence of the damage parameter  $\omega$  on time in hydrogen (1) and air (2) according by developed program (dashed curves) obtained in [17, 18] (solid) and experimental (●) for load 75 МПа (a); 54 (b), and 40 (c).

На рис. 3 для порівняння поряд з результатами, отриманими у повітрі, подано результати розрахунків параметра  $\omega$  з урахуванням наводнювання металу (криві 1). У табл. 1 наведено час до руйнування у повітрі та водні, де  $t_1$  розрахований за кінетичним рівнянням Качанова–Работнова [17];  $t_2$  – за енергетичним підходом (5);  $t_*$  – експериментально [17];  $t_{1H}$  – за кінетичним рівнянням (3);  $t_{2H}$  – за енергетичним підходом;  $t_{*H}$  – експериментально.

Таблиця 1

Навантаження $P$ , МПа	Час до руйнування, h					
	$t_1$	$t_{1H}$	$t_2$	$t_{2H}$	$t_*$	$t_{*H}$
40	9560	8242	9184	7388	9329	7630
54	1704	1432	1601	1242	1632	1301
75	382	303	350	241	358	257

Щоб порівняти результати розрахунків часу до руйнування за кінетичним рівнянням (3) та енергетичним підходом (5), обчислили абсолютні похибки розрахованих значень відносно експериментальних, а також ступінь впливу водню на час до руйнування зразка (табл. 2):

$$\Delta_1 = \left| \frac{t_1 - t_*}{t_1} \right|, \Delta_2 = \left| \frac{t_2 - t_*}{t_2} \right|, \Delta_{1H} = \left| \frac{t_{1H} - t_{*H}}{t_{1H}} \right|, \Delta_{2H} = \left| \frac{t_{2H} - t_{*H}}{t_{2H}} \right|, \quad (7)$$

$$\Delta H_1 = \left| \frac{t_1 - t_{1H}}{t_1} \right|, \Delta H_2 = \left| \frac{t_2 - t_{2H}}{t_2} \right|, \Delta H_* = \left| \frac{t_* - t_{*H}}{t_*} \right|. \quad (8)$$

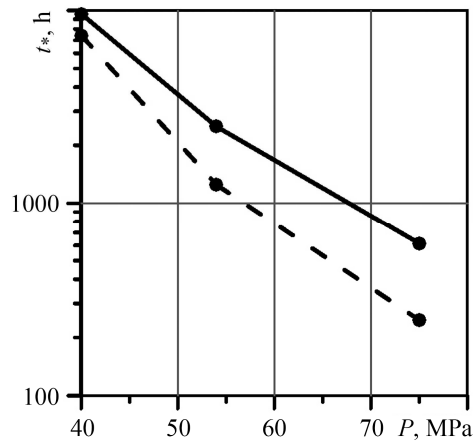
Таблиця 2

Навантаження $P$ , МПа	Абсолютні похибки, %						
	$\Delta_1$	$\Delta_{1H}$	$\Delta_2$	$\Delta_{2H}$	$\Delta H_1$	$\Delta H_2$	$\Delta H_*$
40	2,42	7,42	1,57	3,28	14	19	18
54	4,19	9,19	1,9	4,79	16	22	20
75	6,32	15,32	2,1	6,43	21	30	28

Рис. 4. Діаграми довготривалої міцності ненаводненого (суцільна крива) та наводненого (штрихова) зразка Бріджмена.

Fig. 4. Diagrams of long-term durability of a non-hydrogenated (solid curve) and hydrogenated (dashed) of the Bridgman sample.

Виявили (рис. 4), що водень зменшує довговічність досліджуваного зразка за даних умов навантаження від 18 до 30%. Найвідчутніший його вплив за найвищого навантаження (75 МПа).



### ВИСНОВКИ

Для оцінки міцності та довговічності елементів конструкцій в умовах повзучості під дією водню запропоновано енергетичний підхід. За міру енергетичного пошкодження прийнято відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму до її критичного значення. Це дало можливість описати нагромадження пошкоджень матеріалу, не накладаючи додаткові гіпотези. В основі підходу – зв'язана задача дифузії водню та термов'язкопружності з урахуванням пошкоджень матеріалу за повзучості.

Апробовано запропонований підхід під час розв'язку задачі, для якої відомі експериментальні дані [17, 18]. Подано результати числових досліджень для зразка Бріджмена, виготовленого зі сталі 0,5Cr0,5Mo0,25V, за одновісного розтягу при 640°C у повітрі та після наводнювання. Задачу розв'язано методом скінченних елементів за допомогою програмного пакета MSC MarcMentat 2014.0.0. та власного програмного забезпечення. Побудовано криві, що характеризують кінетику нагромадження пошкоджень як за класичним підходом Качанова–Работнова, так і за енергетичним. Встановлено збіг розрахункових та експериментальних результатів. Проте похибка за енергетичним підходом вдвічі менша, ніж за класичними.

*РЕЗЮМЕ.* Разработана математическая модель и программный модуль, позволяющий оценить накопление повреждений с учетом диффузии водорода. Процесс смоделирован двумя способами: уравнениями Качанова–Работнова–Локощенко с двумя параметрами (повреждение и концентрация водорода) и энергетическим. Для этого использовано образец Бриджмена с учетом и без влияния водорода. Результаты расчетов, полученные двумя подходами, согласуются с экспериментальными. Однако энергетический подход дает вдвое меньшую погрешность.

*SUMMARY.* A mathematical model and a software module have been developed, allowing the estimation of damage accumulation with allowance for hydrogen diffusion. Damage accumulation is modeled in two ways: using Rabotnov–Kachanov–Lokoschenko equations with two parameters (damage and hydrogen concentration) and the energy approach. Mathematical modeling was carried out for the Bridgman sample with and without consideration of the influence of hydrogen. The results of calculations obtained by two approaches give satisfactory convergence with experimental data. However, the energy approach gives twice less error.

*Acknowledgment.* This work was supported by Doctoral Scientific Research Fund from Hubei University of Technology (№ BSQD2017048).

1. *Kachanov L. M.* The Theory of Creep, National Lending Library for Science and Technology. Chaps. IX, X. – England: Boston Spa, 1967.
2. *Rabotnov Y. N.* Creep Problems in Structural Members. – North Holland, Amsterdam, 1969. – 712 p.
3. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металічних матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
4. *Гембара О. В., Чепіль О. Я., Гембара Т. В.* Застосування енергетичного підходу до оцінювання роботоздатності барабана парового котла за термоцикування та наводнювання // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 1. – С. 90–99.  
(*Hembara O. V., Chepil' O. Ya., and Hembara T. V.* Application of the energy approach to the evaluation of the serviceability of the drum of a steam boiler subjected to thermal cycling and hydrogenation // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 1. – P. 102–108.)
5. *Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О. З. Студент, Б. П. Русин, Б. В. Кисіль, М. І. Кобасяр, Т. П. Стахів, А. Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – **39**, № 1. – С. 22–28.*  
(*Quantitative analysis of structural changes in steel caused by high-temperature holding in hydrogen / O. Z. Student, B. P. Rusyn, B. V. Kysil', M. I. Kobasyar, T. P. Stakhiv, A. D. Markov // Materials Science*. – 2003. – **39**, № 1. – P. 17–24.)
6. *Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model / M. B. Djukic, V. Sijacki Zeravcic, G. M. Bakic, A. Sedmak, B. Rajicic // Engng. Failure Analysis*. – 2015. – **58**. – P. 485–498.
7. *Андрейків О. Є., Лесів Р. М., Левицька Н. М.* Ріст тріщин у конструкційних матеріалах за сумісного впливу втоми та повзучості (Огляд) // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 1. – С. 7–24.  
(*Andreikiv O. E., Lesiv R. M., and Levyts'ka N. M.* Crack growth in structural materials under the combined action of fatigue and creep (review) // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 1. – P. 1–17.)

8. *Сташук М. Г.* Оцінювання розподілу водню біля тріщиноподібного дефекту // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 6. – С. 56–62.  
(*Stashchuk M. H.* Determination of the distribution of hydrogen near cracklike defects // Materials Science. – 2017. – **52**, № 6. – P. 803–810.)
9. *Сташук М. Г.* Вплив концентрації водню на напруження у суцільному металевому циліндрі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 6. – С. 73–79.  
(*Stashchuk M. H.* Influence of hydrogen concentration on the stresses in a solid metallic cylinder // Materials Science. – 2018. – **53**, № 6. – P. 823–831.)
10. *Вплив водню на зародження повзучо-втомних тріщин у пластинах біля концентраторів напружень / О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, Л. Н. Добровольська, Н. В. Яворська // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 4. – С. 34–40.*  
(*Influence of hydrogen on the initiation of creep-fatigue cracks in plates near stress concentrators / O. E. Andreikiv, I. Ya. Dolins'ka, L. N. Dobrovol's'ka, N. V. Yavors'ka // Materials Science. – 2015. – 50, № 4. – P. 507–515.*)
11. *Овчинников И. И., Овчинников И. Г.* Влияние водородсодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них // Интернет-журн. "Науковедение". – 2012. – № 4. – С. 1–28.  
– <http://naukovedenie.ru/PDF/60tvn412.pdf>
12. *Гембара О. В., Чепіль О. Я., Гембара Н. Т.* Вплив параметрів дискретизації на точність числового розв'язку тривимірної задачі дифузії водню // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 2. – С. 119–123.  
(*Hembara O. V., Chepil O. Ya., and Hembara N. T.* Influence of the parameters of discretization on the accuracy of numerical solution of the three-dimensional problem of hydrogen diffusion // Materials Science. – 2016. – **52**, № 2. – P. 280–286.)
13. *Локощченко А. М.* Ползучесть и длительная прочность металлов. – М.: Физматлит, 2015. – 504 с.
14. *Lokoshchenko A. M. and Fomin L. V.* Delayed fracture of plates under creep condition in unsteady complex stress state in the presence of aggressive medium // Appl. Math. Modeling. – 2018. – **60**. – P. 478–489.
15. *Fabing Qin, Гембара О. В., Чепіль О. Я.* Моделювання впливу водню на несучу здатність елементів енергетичного обладнання в умовах температурної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 4. – С. 99–106.  
(*Qin F., Hembara O. V., and Chepil' O. Ya.* Modeling of the influence of hydrogen on the bearing ability of elements of the power-generating equipment under the conditions of temperature creep // Materials Science. – 2018. – **53**, № 4. – P. 532–540.)
16. *Chang Shu, Гембара О. В., Чепіль О. Я.* Розрахунок ресурсу теплоенергетичного обладнання за довготривалого статичного навантаження, високої температури та дії водню // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 1. – С. 105–111.  
(*Chang Shu, Hembara O. V., and Chepil' O. Ya.* Calculation of the lifetime of heat and power equipment under long-term static loading, high temperature, and the action of hydrogen // Materials Science. – 2018. – **54**, № 1. – P. 107–114.)
17. *Damage mechanics based predictions of creep crack growth in 316 stainless steel / C. J. Hyde, T. H. Hyde, W. Sun, A. A. Becker // Engng. Fract. Mech. – 2010. – 77. – P. 2385–2402.*
18. *Hyde T. H., Sun W., and Tang A.* Determination of material constants in creep continuum damage constitutive equations // Strain. – 1998. – 8. – P. 83–90.

Одержано 14.01.2019