

УДК 620.197.5: 669.788

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ТОНКОСТІННОГО ЗРАЗКА ЗА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ

О. Я. ЧЕПІЛЬ^{1,2}

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

² Бидгощська Політехніка, Польща

Методом скінченних елементів визначено довговічність тонкостінного плоского зразка, виготовленого зі сталі 22К, за впливу водню і повзучості. Порівняно результати, одержані за класичними рівняннями теорії повзучості та енергетичним підходом. Встановлено задовільну їх збіжність. Однак за енергетичним критерієм можна точніше спрогнозувати час до руйнування, ніж за класичними рівняннями.

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

The durability of a thin-walled plane specimen made of 22K steel under the influence of hydrogen and creep was determined using the finite element method (FEM). A comparative analysis of The results obtained using the classical equations of creep theory and the energy approach were compared. The satisfactory convergence of the results with experimental data is established. However, the energy criterion allows for a more accurate prediction of the time to failure compared to the classical equation.

Keywords: hydrogen concentration, creep, strain energy, damage, long-term strength.

Вступ. Безпеку та надійність енергетичного обладнання в умовах тривалого використання забезпечують як шляхом ефективного контролю за станом металу під час експлуатації, так і вдосконалюючи методи експериментального та аналітичного аналізів для прогнозування залишкового ресурсу [1–3].

Визначення довговічності охоплює оцінку повзучості матеріалу, яка супроводжується накопиченням незворотної деформації і пошкоджень, що з часом може призвести до появи тріщин. Робоче середовище, у якому знаходяться структурні елементи, суттєво впливає на повзучість і довговічність матеріалу, особливо – водневе [4, 5], яке змінює як макро-, так і мікроструктуру матеріалу [6–9]. На макрорівні це проявляється у зниженні міцності та пластичності, тоді як на мікрорівні – у зародженні, розвитку і нагромадженні мікропор, суб- і мікрodefектів та мікротріщин, які викликані як дифузією атомів водню до місць максимальних розтягальних напружень, так і взаємодією дифундованого водню з його пастками у металі. Таким чином, зовнішнє середовище сприяє розвитку вже існуючих або зародженню нових дефектів.

Нижче запропоновано методіку розрахунку міцності елементів конструкцій в умовах повзучості з урахуванням впливу водню, засновану на енергетичному підході. Використовували результати випробувань гладких зразків. Процес накопичення пошкоджень в умовах впливу водню описували класичними рівняннями теорії повзучості [10, 11] та за енергетичним підходом [12–16].

Класичний підхід для розрахунку довговічності тривало експлуатованого обладнання із урахуванням повзучості. Аналізуючи розвиток пошкоджень пов-

зучості у матеріалі, виявили, що модель, запропонована Качановим [3] та пізніше – Работновим [4], досить точно описує поведінку матеріалів. З урахуванням нелінійного кроку за часом t швидкість нагромадження повзучості визначали так [17–19]:

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^c}{dt} = \frac{3}{2} A \sigma_{eq}^{n-1} s_{ij} \left(\frac{1}{1+\omega} \right)^n t^m, \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = B \frac{\sigma_f^\chi}{(1+\phi)(1+\omega)} t^m, \quad (2)$$

де ε_{ij}^c , S_{ij} і σ_{eq}^{n-1} – компоненти багатовісної деформації повзучості та девіаторних напружень, а також еквівалентні напруження за Мізесом, відповідно, а σ_f – напруження руйнування, яке вважають функцією максимального основного напруження σ_1 та еквівалентних напружень σ_{eq} :

$$\sigma_f = \alpha \sigma_1 + (1-\alpha) \sigma_{eq}. \quad (3)$$

Тут α – стала матеріалу, яка описує багатовісний напружений стан матеріалу і знаходиться в діапазоні від $\alpha = 0$ (домінанта еквівалентного напруження) до $\alpha = 1$ (домінанта максимального головного напруження). Точне передбачення напруження σ_f важливе під час застосування багатовісної класичної моделі пошкодження, яка володіє сімома матеріальними константами (A , B , m , n , α , ϕ та χ), необхідними для визначення повзучості і нагромадження пошкодження в матеріалі.

Енергетичний підхід [12, 13]. З його допомогою моделювали ресурс металів за складного напруженого стану.

Для опису довговічності матеріалу використовували критерій руйнування локального елемента моделі, що ґрунтується на енергетичному підході накопичення пошкоджень у ньому. За міру енергетичного пошкодження приймали відношення поточної енергії деформування локального об'єму до критичної [15]:

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

де $W(x, y, z, t) = \iiint_V \sigma_{eq}(x, y, z, t) \dot{\varepsilon}^{cr}(x, y, z, t) dV$ – поточна енергія деформування;

W_C^H – критична з урахуванням впливу воденьвмісного середовища; σ_{eq} , ε^{cr} – еквівалентні напруження та деформації повзучості локального об'єму елемента, які залежать від механічних навантажень, температурного поля і концентрації водню:

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

Локальний об'єм елемента матеріалу зруйнується за досягнення рівності

$$\omega(x_*, y_*, z_*, t_*) = 1. \quad (6)$$

Результати розрахунку та порівняльний аналіз. Створюючи конструкції, які функціонують тривалий час за високих температур, дослідники намагаються зменшити їх масу, використовуючи тонкостінні елементи.

Зразок зі сталі 22К з вирощеною втомною тріщиною наводнювали у спеціальній камері 4 h при 400°C та за тиску водню 10 atm. Далі його встановлювали у захопи та поміщали у камеру, де створювали температуру 300°C та тиск 10 atm., і навантажували зусиллями 0,76 σ_B (0,84 σ_B ; 0,87 σ_B). Використовуючи метод цифрової кореляції зображень [5], визначали переміщення точок поверхні і деформації перед вершиною тріщини. В результаті побудували діаграми повзучості в ко-

ординатах деформація–час для відповідних рівнів навантаження та визначали довговічність зразка.

Методом скінченних елементів моделювали плоский дисковий зразок (рис. 1) 110239 елементами трикутної форми. В околі концентратора напружень сітку згущували. Розраховували для сталі 22К за таких показників: $D = 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, $R = 8,31 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$, $V_H = 1,96 \text{ cm}^3/\text{mol}$, $T = 300^\circ\text{C}$, $\sigma_T = 330 \text{ МПа}$; $\sigma_B = 490 \text{ МПа}$; $S_i = 1350 \text{ МПа}$; радіус вершини тріщини $\rho = 0,05 \text{ mm}$.

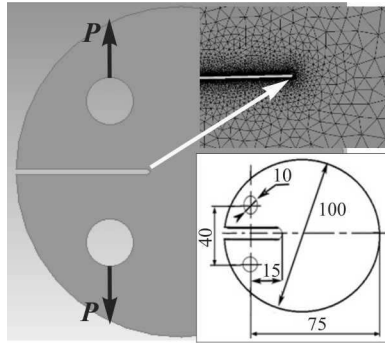


Рис. 1. Схема дискового зразка з боковим надрізом та його розбиття на скінченні елементи в околі тріщини.

Fig. 1. Schematic of a disc specimen with a lateral cut and its partitioning into finite elements in the crack vicinity.

Константи кінетичних рівнянь повзучості та довготривалої міцності сталі отримали шляхом оброблення відповідних кривих. Значення коефіцієнтів такі: $A = 3,069 \cdot 10^{-24} \text{ МПа}^{-n} / \text{с}$, $B = 6,65 \cdot 10^{-14} \text{ МПа}^{-m} / \text{с}$, $n = 6,67$, $m = 4,3$, $a = 1,19 \cdot 10^{-3}$. Параметр пошкоджуваності визначали за кінетичним рівнянням класичної моделі (2) та енергетичним підходом (4) (рис. 2–4).

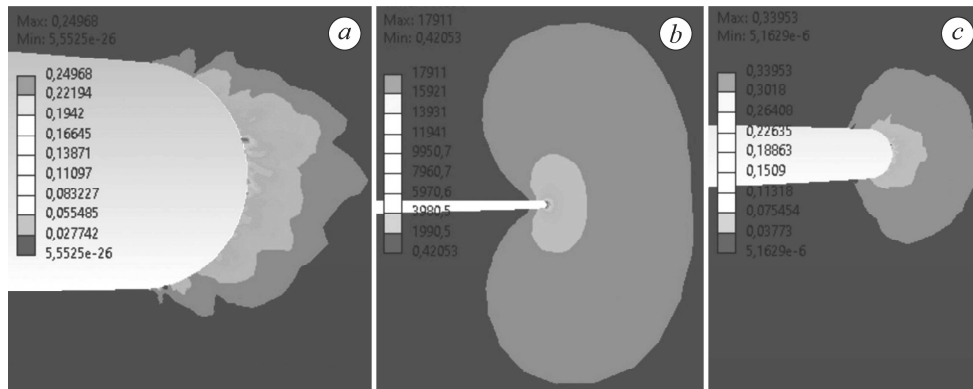


Рис. 2. Розподіл деформацій повзучості (a), еквівалентних напружень (b) та загальних деформацій (c) у зоні передруйнування в околі тріщини в момент досягнення навантаження $0,76 \sigma_B$.

Fig. 2. Distribution of creep strains (a), equivalent stresses (b) and total strains (c) in the prefracture zone in the crack vicinity at the moment of reaching a load of $0,76 \sigma_B$.

Побудували (рис. 5) залежність часу до руйнування від навантаження, де час t_1 розраховували за рівнянням (2), t_2 – за підходом (4), а t_* – експериментально. Виявили, що абсолютні похибки розрахункових і експериментальних результатів збігаються.

Однак за енергетичним підходом похибка втричі менша, ніж за класичною моделлю. Крім того, у першому випадку, щоб ідентифікувати три константи, достатньо мати лише інформацію про повзучість. І, навпаки, щоб використати рівняння класичної моделі, слід встановити три додаткові коефіцієнти. Отже, оцінка міцності структурних компонентів в умовах повзучості з урахуванням впливу водню за енергетичним підходом дає можливість всебічно відтворити всі

етапи, пов'язані з поступовою деградацією матеріалів під впливом воденьвмісного середовища за статичного сталого навантаження.

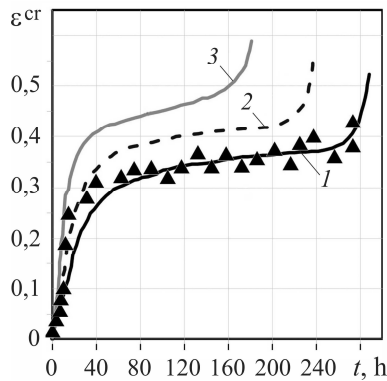


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Криві повзучості для сталі 22К в околі вершини тріщини: лінії – розрахунок (1 – $0,76 \sigma_B$; 2 – $0,84 \sigma_B$; 3 – $0,87 \sigma_B$); символи – експеримент.

Fig. 3. Creep curves of 22K steel in the crack tip vicinity: lines – calculation (1 – $0,76 \sigma_B$; 2 – $0,84 \sigma_B$; 3 – $0,87 \sigma_B$); triangles – experiment.

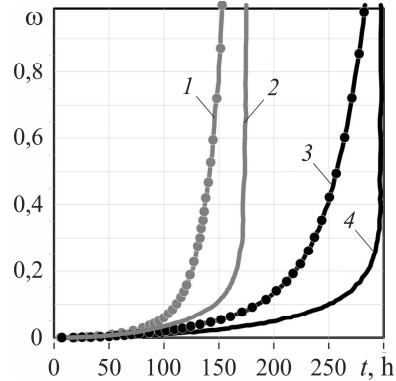


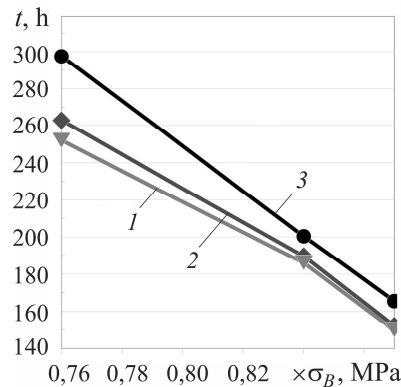
Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Залежність параметра пошкоджуваності ω від часу, визначена в околі вершини тріщини за кінетичним рівнянням класичної моделі пошкодження (2) (криві 1, 3) та енергетичним підходом (4) (криві 2, 4): 3, 4 – $0,76 \sigma_B$; 1, 2 – $0,87 \sigma_B$.

Fig. 4. Dependence of the damage parameter ω on time, determined in the crack tip vicinity according to the classical kinetic equation of the classical damage model (2) (curves 1, 3) and the energy approach (4) (curves 2, 4): 3, 4 – $0,76 \sigma_B$; 1, 2 – $0,87 \sigma_B$.

Рис. 5. Залежність часу до руйнування, визначеного за класичним методом (крива 3), енергетичним підходом (крива 2) та експериментально (крива 1), від прикладеного напруження.

Fig. 5. Dependence of the time to fracture determined by the classical method (curve 3), the energy approach (curve 2) and experimentally (curve 1) on the applied stress.



ВИСНОВКИ

Запропоновано за енергетичним підходом оцінити надійність та витривалість структурних компонентів в умовах повзучості з урахуванням впливу водню. Методологія поєднує зв'язану задачу дифузії водню та термопластичності, а також враховує погіршення властивостей матеріалу під час повзучості. Передбачено, що відношення значення енергії, пов'язаного з пружно-пластичною деформацією локального об'єму, до її критичного, є показником пошкоджуваності. Параметр пошкоджуваності встановлено за кінетичним рівнянням класичної моделі пошкодження та енергетичним підходом.

1. *Damage mechanics based predictions of creep crack growth in 316 stainless steel* / C. J. Hyde, T. H. Hyde, W. Sun, and A. A. Becker // *Eng. Fract. Mech.* – 2010. – № 77(12). – P. 2385–2402.
2. *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. Fail. Analysis.* – 2021. – № 123. – Article number: 105312.
3. *Murakami S., Liu Y., and Mizuno M.* Computational methods for creep fracture analysis by damage mechanics // *Computer Methods in Appl. Mech. and Eng.* – 2000. – № 183(1–2). – P. 15–33. DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00209-1
4. *Liu Y. and Murakami S.* Damage localization of conventional creep damage models and proposition of a new model for creep damage analysis // *JSME Int. J. Ser. a-Solid Mech. and Mat. Eng.* – 1998. – № 41(1). – P. 57–65. DOI: 10.1299/jsmea.41.57
5. *Stashchuk M. and Dorosh M.* Evaluation of hydrogen stresses in metal and redistribution of hydrogen around crack-like defects // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2012. – 37. – P. 14687–14696.
6. *Dmytrakh I. M., Leshchak R. L., and Syrotyuk A. M.* Influence of sodium nitrite concentration in aqueous corrosion solution on fatigue crack growth in carbon pipeline steel // *Int. J. of Fatig.* – 2019. – № 128. – Article number: 105192.
7. *Dmytrakh I. M., Smiyan O. D., and Syrotyuk A. M.* Experimental study of fatigue crack growth in pipeline steel under hydrogenating conditions // *Frac. Mater. Struct. Micro Macro Scale: 18th Europ. Conf. Fracture (ECF-18), DVM.* – Dresden, 2010.
8. *Dmytrakh I., Syrotyuk A., and Leshchak R.* Specific effects of hydrogen concentration on resistance to fracture of ferrite-pearlitic pipeline steels // 6th *Int. Conf. Fract. Mech. of Mater. and Struct. Integrity (Fmsi 2019).* – 2019. – № 16. – P. 113–120. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.029
9. *Effects of hydrogen influence on strained steel 1020* / B. Mytsyk, Y. Ivanytskyi, O. Hembara, Y. Kost, S. Shtayura, O. Sakharuk // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2020. – № 45(16). – P. 10199–10208. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.004
10. *Determination of the period of subcritical growth of creep-fatigue cracks under block loading* / O. Andreikiv, V. Skalskyi, V. Opanasovych, I. Dolinska, and I. Shtoiko // *J. of Mathematical Sci.* – 2017. – № 222(2). – P. 103. DOI: 10.1007/s10958-017-3285-8
11. *Meng, Q. and Wang, Z.* Creep damage models and their applications for crack growth analysis in pipes: A review // *Eng. Fract. Mech.* – 2019. – № 205. – P. 547–576.
12. *Jiang Q., Hembara O. V., and Chepil O. Ya.* Modeling of the influence of hydrogen on the accumulation of defects in steels under high-temperature creep // *Materials Science.* – 2019. – 55, № 2. – P. 245–253. DOI: 10.1007/s11003-019-00296-x
13. *Hembara O. V., Chepil O. Y., 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. DOI: 10.1007/s11003-017-0049-z
14. *Shu C., 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. DOI: 10.1007/s11003-018-0164-5
15. *Panasyuk V., Ivanytskyi Y., and Hembara O.* Assessment of hydrogen effect on fracture resistance under complex-mode loading // *Eng. Fract. Mech.* – 2012. – № 83. – P. 54–61. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.12.010
16. *Influence of the stress-strain state on the distribution of hydrogen concentration in the process zone* / V. V. Panasyuk, Y. L. Ivanyts'kyi, O. V. Hembara, and V. M. Boiko // *Materials Science.* – 2014. – 50, № 3. – P. 315–323. DOI: 10.1007/s11003-014-9723-6
17. *Hyde T. H., Xia L., and Becker A. A.* Prediction of creep failure in aeroengine materials under multi-axial stress states // *Int. J. of Mech. Sci.* – 1996. – 38, № 4. – P. 385–401. DOI: 10.1016/0020-7403(95)00063-1
18. *Hayhurst D. R., Brown P. R., and Morrison C. J.* The role of continuum damage in creep crack growth // *Philosophical Transact. of the Royal Society of London. Ser. A, Mathematical and Physical Sci.* – 1984. – 311, № 1516. – P. 131–158.
19. *Hayhurst D. R. and Felce I. D.* Creep-Rupture under Triaxial Tension // *Eng. Fract. Mech.* – 1986. – № 25(5–6). – P. 645–664. DOI: 10.1016/0013-7944(86)90030-5

Одержано 23.03.2024