

УДК 620.197.5: 669.788

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ПОВЗУЧОСТІ ЗА НАВОДНЮВАННЯ МЕТАЛУ ТА СКЛАДНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

JIN CONGYUAN¹, О. В. ГЕМБАРА^{2,3}, М. В. ГРИНЕНКО²

¹ Wuhan Fiberhome Technical Services Co., Ltd., Wuhan, China;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Національний університет "Львівська політехніка"

Сформульовано розрахункову модель для оцінювання впливу водню на деформації повзучості в металі за складного напруженого стану. Визначено напружено-деформований стан тонкостінного трубчастого зразка за складного навантаження та повзучості за наводнювання матеріалу. Встановлено вплив виду навантаження на час до руйнування зразка. Показано, що зразки за розтягу з внутрішнім тиском руйнуються на 30% швидше, ніж зразки за одновісного розтягу, а також, що водень зменшує приблизно на 14% тривалість експлуатації матеріалу за всіх видів навантаження.

Ключові слова: наводнювання, складний напружений стан, повзучість, пошкодження, довговічність.

A computational model for estimating the effect of hydrogen on creep deformations in metal under complex stress state is formulated. The stress-strain state of a thin-walled tubular sample under complex loading and creep is determined. The influence of the type of load effect on the time prior to the sample fracture is established. It is shown that the specimens under tension with internal pressure fracture by 30% faster than the specimens under uniaxial tension. The presence of hydrogen reduces the service life of the material by approximately 14% under all types of loading.

Keywords: hydrogenation, complex stress-strain state, creep, damage, durability.

Вступ. Більшість реальних елементів конструкцій працюють в умовах складного напруженого стану. Аналіз опублікованих результатів [1–7] довготривалих випробувань конструкційних матеріалів, які працюють за таких умов, переконливо свідчить про те, що пластичне деформування матеріалів за повзучості істотно залежить від виду напруженого стану.

Розрахунки елементів конструкцій, експлуатованих в умовах повзучості, здебільшого базуються на результатах її експериментального визначення за одновісного розтягу, причому найбільший інтерес становить перша і друга стадії повзучості, оскільки за експлуатації елементів конструкцій не допускається втрата стійкості або розвиток тріщини, що характерно для третьої стадії.

Одним з важливих чинників, які суттєво впливають на характеристики повзучості і довготривалої міцності, є воденьвмісне середовище. Зокрема, показано [8–11] інтенсифікувальний вплив водню на повзучість сталі. Проте лабораторні дослідження матеріалів за повзучості є довготривалими. Тому удосконалення та розвиток розрахункових методів для моделювання нагромадження пошкодження дасть змогу заощаджувати час під час досліджень на повзучість.

Математичне моделювання впливу водню на повзучість металу. Для опису повзучості найперспективнішою є запропонована [12] концепція механіч-

ного рівняння стану, коли швидкість повзучості матеріалу в кожний момент часу t залежить від прикладеного напруження, температури і структурного стану матеріалу в момент, який можна характеризувати набором величин q_1, q_2, \dots, q_n , які називаються структурними параметрами. Основні рівняння теорії Работнова складаються з рівняння механічного стану

$$\dot{\epsilon}_c = f(\sigma, T, q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (1)$$

і системи кінетичних рівнянь для визначення параметрів q_i ($i = 1, \dots, n$).

Одним з структурних параметрів є параметр ω , який характеризує ступінь пошкодження матеріалу, а саме зменшення ефективної площі поперечного перерізу і повинен задовольняти умови

$$\omega(t=0) = 0, \quad \omega(t^*) = 1. \quad (2)$$

У літературі описані два способи для врахування впливу водню на повзучість металу. У першому використовують відомі формули для визначення деформацій повзучості на повітрі, за умови, що константи матеріалу залежать не тільки від температури, а й від концентрації водню. Проте цей метод незручний тим, що необхідно експериментально встановити залежності всіх констант матеріалу від концентрації водню, що є досить важко.

Другий спосіб запропоновано в працях [13–19]. За впливу воденьмісного середовища другим структурним параметром є концентрація водню. Для цього вводимо функцію $f(C)$, яка характеризує вплив водню на структурну цілісність матеріалу і повинна задовольняти умови

$$f(C(x, y, z, t)) > f(0), \quad f(C=0) = 1. \quad (3)$$

Експериментально значення функції $f(C)$ визначають за співвідношенням відповідних значень часу руйнування $t^*(C)/t^*(C=0)$.

Тоді кінетичні рівняння Качанова–Работнова–Локощенко [4, 12, 20] записують у вигляді

$$\frac{d\epsilon_{ij}^{cr}}{dt} = \frac{3}{2} A \left(\frac{\sigma_{eq}}{1-\omega} \right)^n \frac{S_{ij}}{\sigma_{eq}} t^m f_1 \left(\frac{C}{C_0}, t \right), \quad (4)$$

де $\epsilon_{ij}^{cr}, S_{ij}, \sigma_{eq}$ – компоненти деформації повзучості, девіаторних напружень та еквівалентні напруження Мізеса; ω – параметр довговічності матеріалу; C – концентрація водню; C_0 – її початкове значення; сталі матеріалу $A, B, n, m, q_2, \phi, \chi$ залежать тільки від температури.

Найпростіший вигляд функцій $f_i(C/C_0, t)$ ($i = 1, 2, 3, 4$) такий [5]:

$$f_i(C/C_0, t) = 1 + a_i C(t)/C_0, \quad (5)$$

де коефіцієнти a_i визначають експериментально і залежать як від температури, так і від концентрації водню.

Розподіл концентрації водню біля концентратора напружень обчислюємо на основі розв'язку рівняння Фіка [21]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \bar{\nabla} (D \bar{\nabla} C) - \bar{\nabla} \left(\frac{DVC}{RT} \bar{\nabla} \sigma_h \right), \quad (6)$$

де D – коефіцієнт дифузії; σ_h – гідростатичні напруження; R – універсальна газова стала; T – температура.

Апробація моделі. Для експериментальної перевірки розрахункової моделі використали дослідні дані за повзучості і тривалої міцності тонкостінних циліндричних зразків зі сталі 12X18H10T за $T = 850^{\circ}\text{C}$ [3, 4, 22]. Там подано експериментальні результати з тривалої міцності для 69 зразків за трьох видів напруженого стану: одновісного розтягу, розтягування і кручення, внутрішнього тиску і розтягування (рис. 1). Розраховували для тонкостінного циліндричного зразка (довжиною 100 mm, радіуси внутрішнього і зовнішнього кола 5,5 та 6 mm відповідно). Складне навантаження моделювали напруженнями σ_1 та σ_2 (табл. 1).

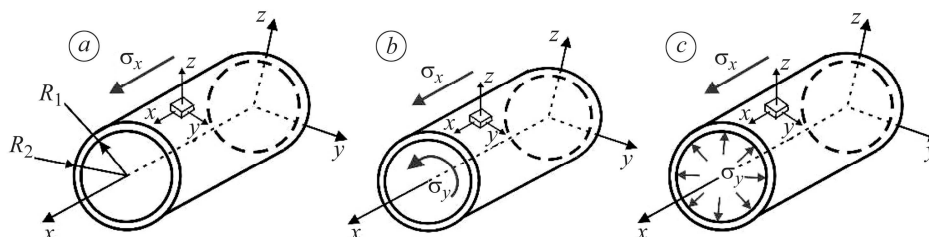


Рис. 1. Схематичне зображення трубчастого зразка за складного навантаження:
a – одновісний розтяг; *b* – одновісний розтяг з крученням;
c – розтяг з внутрішнім тиском.

Fig. 1. Schematic representation of a tubular specimen under complex loading:
a – uniaxial tension; *b* – uniaxial tension-torsion;
c – uniaxial tension with internal pressure.

Таблиця 1. Види навантажень та напруження

Тип навантаження	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа
Розтяг	49,05	0
Розтяг–кручення	49,05	-19,62
Розтяг–внутрішній тиск	49,05	19,62

Для розрахунків використовували програму MSC Marc Mentat 2016, яка має багато функцій та дає змогу зручно моделювати елементи конструкцій різноманітної форми. Зразок розбили на 25500 елементів паралелепіпедоподібної форми.

На рис. 2 подано розподіл деформації повзучості цього зразка під час експлуатації та в момент руйнування за одновісного розтягу з внутрішнім тиском.

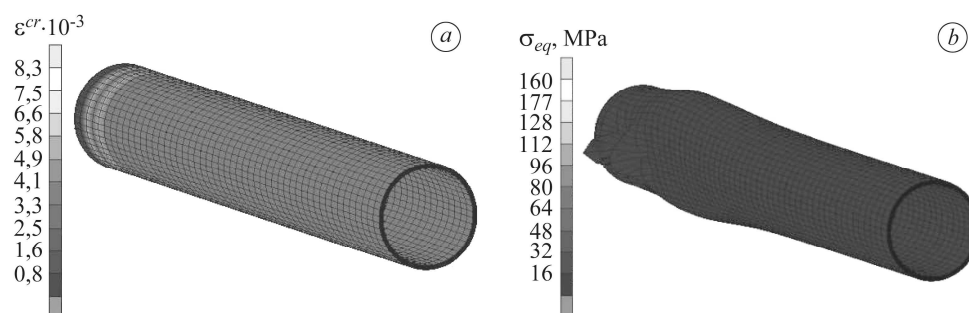


Рис. 2. Розподіл деформацій повзучості трубчастого зразка під час експлуатації (*a*) та в момент руйнування (*b*) за одновісного розтягу та внутрішнього тиску.

Fig. 2. Distribution of creep deformations of a tubular specimen during operation (*a*) and at the moment of failure (*b*) in the case of uniaxial tension and internal pressure.

За отриманими розрахунковими результатами встановили зміну деформації повзучості з часом без та з врахуванням наводнювання металу для трьох типів навантаження (рис. 3).

Як бачимо, водень зменшує час до руйнування за всіх видів навантаження, але особливо він впливає на критичне значення деформації повзучості, за якого зразок руйнується (табл. 2). Так, за одновісного розтягу та розтягу з крученням критична деформація для наводнених зразків зменшується майже вдвічі порівняно з ненаводненими.

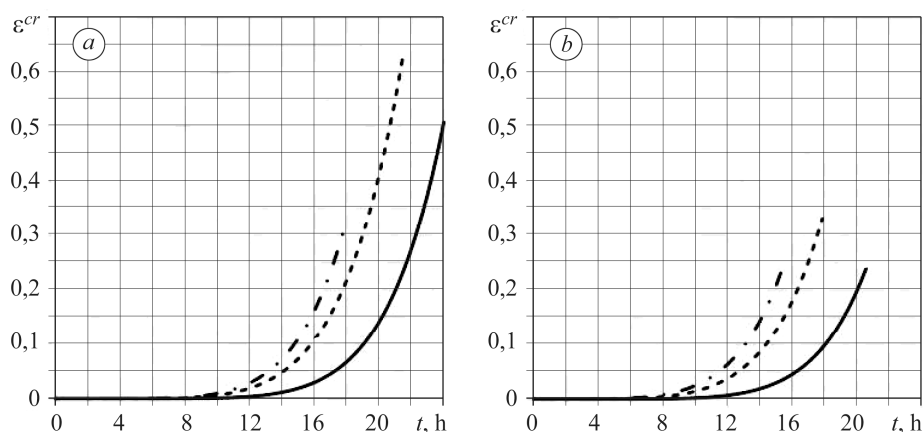


Рис. 3. Залежність деформації повзучості від часу у ненаводненому (а) та наводненому (b) зразках за розтягу (суцільні криві), розтягу–кручення (штрихові) та розтягу з внутрішнім тиском (штрихпунктирні).

Fig. 3. Dependence of creep strain on time for non-hydrogenated (a) and hydrogenated samples (b) under tension (solid lines), tension-torsion (dashed lines) and tension with internal pressure (dash-dotted lines).

Таблиця 2. Критичне значення деформації повзучості

Тип навантаження	ϵ^{cr} для зразків	
	ненаводнених	наводнених
Розтяг	0,51	0,24
Розтяг–кручення	0,63	0,33
Розтяг–внутрішній тиск	0,3	0,23

Як сказано вище, розрахунки елементів конструкцій, які працюють в умовах повзучості, здебільшого базуються на результатах експериментального вивчення повзучості за одновісного розтягу. Але це не зовсім коректно. Оскільки, як видно з рис. 3 та табл. 3, зразки за розтягу з внутрішнім тиском руйнуються на 6 h швидше, ніж зразки за одновісного розтягу. Подано (табл. 3) усереднені результати часу до руйнування, визначеного експериментально для кожного режиму навантаження на повітрі, та розрахункові для ненаводнених та наводнених зразків.

На рис. 4 зображено вплив водню на зміну деформації повзучості з часом для трьох типів навантаження. Як бачимо, водень скорочує час до руйнування за всіх видів навантаження. Для ненаводнених зразків експериментальні та розрахункові результати збігаються з достатньою точністю в межах 4...5%.

Наводнювання зразків приблизно на 14% зменшує час до їх руйнування.

Таблиця 3. Терміни експлуатації

Тип навантаження	Експериментальні результати t^* , h для ненаводнених зразків	Розрахункові t^* , h для зразків	
		ненаводнених	наводнених
Розтяг	23	24	20,5
Розтяг–кручення	20	21,5	18
Розтяг–внутрішній тиск	17	18	15,5

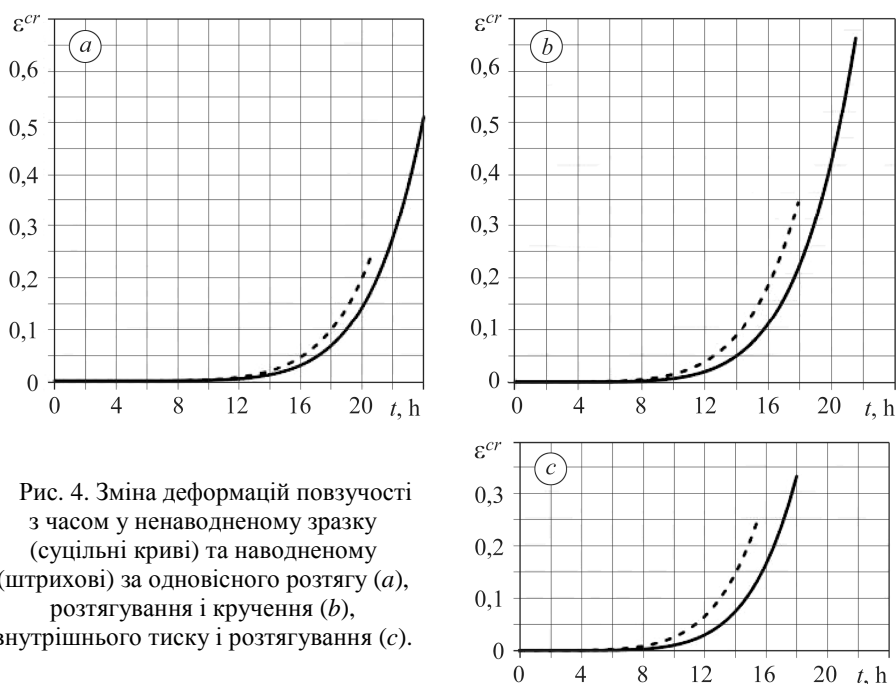


Рис. 4. Зміна деформацій повзучості з часом у ненаводненому зразку (суцільні криві) та наводненому (штрихові) за одновісного розтягу (а), розтягування і кручення (b), внутрішнього тиску і розтягування (c).

Fig. 4. Change in creep deformations with time for non-hydrogenated (solid curves) and hydrogenated samples (dashed curves) under uniaxial tension (a), tension and torsion (b), internal pressure and tension (c).

ВИСНОВКИ

Сформульовано розрахункову модель для оцінювання впливу водню на деформації повзучості в металі за складного напруженого стану. Виконано порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних результатів щодо тривалості міцності тонкостінних трубчастих зразків зі сталі 12X18H10T за $T = 850^{\circ}\text{C}$ для трьох видів напруженого стану: розтягування, кручення і розтягування, внутрішній тиск і розтягування. Встановлено, що зразки за розтягу з внутрішнім тиском руйнуються на 26% швидше, ніж зразки за одновісного розтягу. Тому не зовсім коректно розраховувати елементи конструкцій, які працюють в умовах повзучості, базуючись на результатах, отриманих за одновісного розтягу. Водень приблизно на 14% зменшує тривалість експлуатації матеріалу за всіх видів навантаження.

Acknowledgements. This work was supported by the National Research Foundation of Ukraine (Project Number: 2020.02/0049) and by the Technology Innovation Special Program of Hubei Province (2019AAA047), Key Technologies R & D Program of Hubei Province (2020BHB004).

1. *Experimental and computed stress distribution ahead of a notch in a pressure vessel: application of T-stress conception / H. Moustabchir, Z. Azari, S. Hariri, and I. Dmytrakh // Computational Materials Science. – 2012. – 58. – P. 59–66.*
2. *Сиротюк А. М., Дмитрах І. М. Методи оцінювання руйнування та міцності трубопроводних сталей та конструкцій за дії робочих середовищ. Ч. II. Вплив воднево-місних середовищ // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 4. – С. 7–17.*
(*Syrotyuk A. M. and Dmytrakh I. M. Methods for the evaluation of fracture and strength of pipeline steels and structures under the action of working media. Part 2. Influence of hydrogen-containing media // Materials Science. – 2015. – 50, № 4. – P. 475–487.*)
3. *Локощенко А. Длительная прочность металлов при сложном напряженном состоянии // Проблемы прочности. – 1983. – № 8. – С. 55–59.*
4. *Локощенко А. М., Шестериков С. А. Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – № 3. – С. 155–159.*
5. *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. Modelling. – 2018. – 60. – С. 478–489.*
6. *Морачковский О. К., Ромашиов Ю. В. Континуальная модель роста трещин коррозионного растрескивания для расчета ресурса конструкций // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 2. – С. 111–116.*
(*Morachkovskii O. K. and Romashov Yu. V. Continual model of propagation of corrosion cracks for the evaluation of the service life of structures // Materials Science. – 2010. – 46, № 2. – P. 254–259.*)
7. *Murakami S., Liu Y., and Mizuno M. Computational methods for creep fracture analysis by damage mechanics // Comput. Methods in Appl. Mech. Engng. – 2000. – 183, № 1–2. – С. 15–33.*
8. *Stashchuk M. and Dorosh M. Analytical evaluation of hydrogen induced stress in metal // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2017. – 42, № 9. – P. 6394–6400.*
9. *Гембара О. В., Андрейків О. С. Вплив наводнювання стінок нафтових та газових трубопроводів на їх ґрунтову корозію і довговічність // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 5. – С. 27–34.*
(*Hembara O. V. and Andreikiv O. E. Effect of hydrogenation of the walls of oil-and-gas pipelines on their soil corrosion and service life // Materials Science. – 2012. – 47, № 5. – P. 598–607.*)
10. *Panasyuk V., Ivanytskyi Y., and Hembara O. Assessment of hydrogen effect on fracture resistance under complex-mode loading // Engng. Fract. Mech. – 2012. – 83. – P. 54–61.*
11. *Гембара О. В., Терлецька З. О., Чепіль О. Я. Визначення електричних полів у системі електроліт–метал // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 2. – С. 71–77.*
(*Hembara O. V., Terlets'ka Z. O., and Chepil' O. Ya. Determination of electric fields in electrolyte–metal systems // Materials Science. – 2007. – 43, № 2. – P. 222–229.*)
12. *Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.*
13. *Jiang Qionqin, Гембара О. В., Чепіль О. Я. Моделирование влияния водню на накопление повреждений у сталях за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – 55, № 2. – С. 104–111.*
(*Jiang Q., Hembara O. V., and Chepil' O. Y. 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.*)
14. *Fabing Qin, Гембара О. В., Чепіль О. Я. Моделирование влияния водню на несущую способность элементов энергетического оборудования в условиях температурной повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 4. – С. 99–106.*
(*Qin F., Hembara O. V., and Chepil O. Y. 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.*)
15. *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.*

- (*Shu C., Hembara O. V., and Chepil O. Y.* 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.)
16. *Гембара О. В., Чепіль О. Я., Гембара Т. В.* Застосування енергетичного підходу до оцінювання робоздатності барабана парового котла за термоцикування та наводнювання // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2017. – **53**, № 1. – С. 90–95.
(*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.)
17. *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. Y., 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.)
18. *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.)
19. *The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation / Ya. Ivanytskyi, Ye. Kharchenko, O. Hembara, O. Chepil, Ya. Sapuzhak, and N. Hembara* // *Procedia Structural Integrity.* – 2019. – **16**. – С. 126–133.
20. *Качанов Л. М.* Теория ползучести. – М.: Физматлит, 1960. – 456 с.
21. *Андрейків О., Гембара О.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 346 с.
22. *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 (18). – С. 75–84.

Одержано 15.01.2021