

УДК 535.3: 620.179.17

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБОЛОНКОПОДІБНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА НАВАНТАЖЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ ВОДНЮ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ¹, О. П. МАКСИМЕНКО¹, С. Т. ШТАЮРА¹,
М. В. ГРИНЕНКО¹, І. В. МЕЛЬНИК²

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

² Національний університет "Львівська політехніка"

Розроблено методу оцінювання напружено-деформованого стану в циліндричних оболонках з урахуванням зовнішніх силових навантажень та впливу газоподібного водню. Виявлено, що зі збільшенням внутрішніх пошкоджень суттєво зростає концентрація поглинутого водню, що призводить до окрихчення металу. Внаслідок зниження питомої енергії руйнування зменшується опірність матеріалу деформуванню. Методом скінченних елементів проаналізовано розподіл аксіальних, тангенціальних та радіальних напружень у стінках циліндричних оболонок, а також їх вплив на загальну деформівність конструкцій. Особливу увагу приділено впливу попереднього деформування матеріалу і водневої деградації на опірність руйнуванню. Встановлено, що наводнювання може суттєво знижувати критичну деформацію, пришвидшуючи руйнування, особливо за високої концентрації водню. Попередня пластична деформація сприяє збільшенню внутрішніх пошкоджень у металі та значному зростанню концентрації поглинутого водню, що спричиняє його окрихчення та зниження питомої енергії руйнування.

Ключові слова: оболонкові конструкції, сталь, наводнювання, концентрація водню, напружено-деформований стан, пружно-пластичне деформування, окрихчення металу, метод оптико-цифрової кореляції, метод скінченних елементів, опірність руйнуванню.

A method for assessing the stress-strain state in cylindrical shells was developed, taking into account the effect of external force loads and the influence of absorbed hydrogen. This influence promotes an increase in internal damage to the metal and a significant rise in the concentration of absorbed hydrogen, leading to the overall embrittlement of the metal. As a result of reduction of the specific fracture energy the material damage resistance decreases. The finite element method and the digital image correlation method was employed to analyze the distribution of axial, tangential, and radial stresses in the walls of cylindrical shells, as well as their effect on the overall deformability of the structures. Special attention was paid to the influence of prior material deformation and hydrogen degradation on the material resistance to fracture. The results showed that hydrogenation could significantly reduce critical strain, accelerating the fracture process, especially at high hydrogen concentration. Pre-strain plastic deformation contributes to an increase in internal damage in the metal and a substantial rise in the concentration of absorbed hydrogen, leading to the overall embrittlement of the metal and the specific fracture energy decrease.

Keywords: shell structures, steel, hydrogen charging, hydrogen concentration, stress-strain state, elastioplastic deformation, metal embrittlement, digital image correlation method, finite element method, fracture resistance.

Контактна особа: Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, e-mail: ivayar@ukr.net

Вступ. Циліндричні оболонкові конструкції – важливі елементи, які часто використовують у нафтогазовій, енергетичній, оборонній і авіаційній галузях. Тут однією з найбільших проблем є вплив водню, який може проникати в матеріал, змінюючи його структуру та знижуючи механічні характеристики [1, 2]. Цей процес, відомий як воднева деградація, послаблює опірність матеріалу деформуванню і руйнуванню, а також пришвидшує передчасний вихід з ладу конструкцій за одночасної дії навантажень і високих температур [3–6].

Водночас встановили, що водневе середовище знижує критичні параметри деформації та активізує нагромадження пошкоджень [7–9], а попереднє пластичне деформування матеріалу в умовах водневої деградації – довговічність і тривкість конструкцій [10–12].

Сучасні дослідження [9] спрямовані на розроблення енергетичних підходів до оцінки впливу водню на руйнування металів за складних умов навантаження. За результатами моделювання та визначення напружено-деформованого стану (НДС) в елементах конструкцій методами скінченних елементів (МСЕ) і оптико-цифрової кореляції зображень аналізують процеси деградації, враховуючи аксіальні, радіальні і тангенціальні напруження під час прогнозування довговічності конструкцій [1, 7, 12].

Мета дослідження – розробити методологію оцінки НДС циліндричних оболонок, беручи до уваги вплив водню та попереднє пружно-пластичне деформування. Для цього поєднали експериментальні методи механіки руйнування (оптико-цифрову кореляцію спекл-зображень (ОЦКСЗ)) [13] і числові.

Методи випробувань. НДС у циліндричних оболонкових конструкціях розраховували числовим моделюванням, використовуючи МСЕ. Для цього розробили спеціальний алгоритм, який реалізували у програмному забезпеченні Ansys. Він дає можливість враховувати попередню деформацію матеріалу та наводнювання, що критично важливо під час моделювання реальних умов експлуатації. Використовували енергетичний критерій руйнування, який враховує вплив зовнішнього навантаження, температури та концентрації поглинутого водню на матеріал. Так оцінювали вплив різних фізичних величин у локальному об'ємі матеріалу, визначали зміну його механічних характеристик під навантаженням та брали до уваги сумарні зміни деформаційних напружень та концентрацію водню. Тут особливо важливо вивчити розподіл напружень та деформацій по товщині стінки циліндричної оболонки.

Для експериментальних досліджень та визначення НДС використовували метод ОЦКСЗ, вдаваючи сталю кульку, яку змодельовали як абсолютно жорстке тіло, в отвір оболонки (рис. 1). Так у стінці циліндричної оболонки формували різний НДС матеріалу. Реєстрували 2D переміщення на зовнішній поверхні, а також зміну товщини стінки на торцевій частині зразка.

Для випробувань зі сталі 45 виготовляли шість трубчастих зразків зі зовнішнім діаметром $D = 30$ mm. Внутрішній d змінювали в діапазоні 18÷23 mm. Висота всіх зразків h становила 50 mm, а товщина стінки t змінювалась від 3,5 до 6 mm. Таким чином, вдаваючи гартовану кульку діаметром 23,8 mm в отвори різного діаметра, змінювали НДС у стінці зразка, який реєстрували методом ОЦКСЗ (рис. 1.)

Поверхню оболонки заздалегідь обробляли, наносячи стохастичний крапковий малюнок (спекли), щоб надійно відстежувати деформації поверхні. Серію зображень під час навантаження зразка реєстрували двома відеокамерами Sigeta 3100. Далі, використовуючи програмне забезпечення NCORR [14], визначали зміну розташування спеклів на поверхні зразка та встановлювали деформації на кожному етапі навантаження.

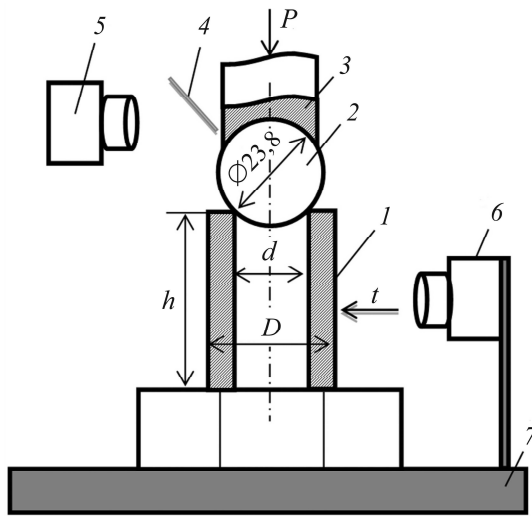


Рис. 1. Схема навантаження зразка та реєстрації переміщень на боковій і торцевій поверхнях: 1 – зразок; 2 – сферична куля; 3 – індентор; 4 – дзеркало; 5, 6 – відеокамери для реєстрації зображень торцевої та бокової поверхонь; 7 – нерухома платформа випробувальної установки.

Fig. 1. Schematic of sample loading and displacement measurement on the lateral and face surfaces: 1 – sample; 2 – spherical ball; 3 – indenter; 4 – mirror; 5, 6 – camera for measuring displacements on the face and lateral surface of the sample; 7 – fixed platform of the testing machine.

Під час вдавлювання кульки індентором реєстрували зображення спеклів на торцевій частині оболонки. Використовуючи програмне забезпечення NCORR і зареєстровані зображення, визначали значення та розподіл аксіальних і тангенціальних деформацій на боковій поверхні та радіальних – на торцевій.

Еквівалентну деформацію ϵ_{eq} розраховували за формулою

$$\epsilon_{eq} = \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\frac{1}{2} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]},$$

де ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 – радіальні, тангенціальні та аксіальні деформацій; ν – коефіцієнт Пуассона. Геометричні розміри оболонок та значення еквівалентної деформації в результаті пружно-пластичного деформування подано у таблиці.

Розміри зразків та еквівалентні деформації

№ зразка	Початкові розміри		Еквівалентна деформація (%), визначена			
	d, mm	t, mm	методом ОЦКСЗ		МСЕ	
			ϵ_{eq}^i	ϵ_{eq}^e	ϵ_{eq}^i	ϵ_{eq}^e
1	18	6	46,5	25,7	46,13	25,3
2	19	5.5	37,3	21,9	36,94	21,62
3	20	5	28,86	18,1	28,57	17,82
4	21,1	4.45	20,48	13,94	20,29	13,74
5	22	4	13,96	10,01	13,81	9,89
6	23	3.5	7,33	5,73	7,24	5,66

Запропонованим підходом вдалося отримати результати про розподіл локальних деформацій у різних частинах оболонки, зокрема, в критичних зонах контакту сталеві кулі з її внутрішньою поверхнею. Методом ОЦКСЗ експериментально визначили локальні напруження та порівняли їх із розрахованими під час моделювання, що стало важливим кроком у дослідженні впливу водню на опірність матеріалу руйнуванню.

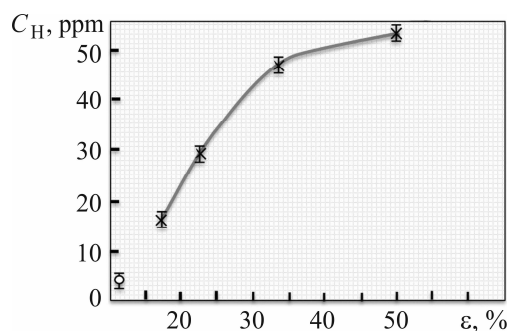
Результати та їх обговорення. МСЕ проаналізували нагромадження пошкоджень у матеріалі за пружно-пластичного деформування і впливу наводнювання. Виявили, що наводнювання із попереднім деформуванням суттєво змінює його НДС.

Встановили, що аксіальне напруження через дію внутрішнього тиску розподіляється рівномірно по всій товщині стінки оболонкових конструкцій. Це пояснюють тим, що в таких виробках напруження залежить лише від внутрішнього тиску та геометрії оболонки в межах товщини стінки. Таким чином, для всіх точок стінки циліндра аксіальне напруження залишається сталим. Тангенціальне під внутрішнім тиском також розподілене рівномірно по всій товщині стінки. Це спричинено тим, що в тонкостінних оболонках деформації однорідні по товщині, а отже, напруження у будь-якій точці стінки однакове.

Для внутрішньої поверхні оболонки радіальне напруження рівне прикладеному внутрішньому тиску і поступово зменшується з наближенням до зовнішньої поверхні за лінійним законом. Наводнювали зразки за різної деформації у камері за тиску водню 6 МПа і температури 400°C упродовж різного часу. В результаті отримали зразки, насичені воднем різної концентрації, яку визначали газоаналізатором ДН-603, використовуючи опційний розжарюваний модуль. Кількість залишкового водню аналізували, встановлюючи заздалегідь зважену пробу в піч, де він виділявся під час гарячої екстракції у потоці газу. Зміну концентрації поглинутого матеріалом водню визначали за різної попередньої пружно-пластичної деформації (рис. 2).

Рис. 2. Залежність концентрації поглинутого водню C_H від істинної попередньої деформації ϵ для сталі 45:
 ○ – недеформований зразок,
 × – деформований.

Fig. 2. Distribution of absorbed hydrogen concentration C_H as a function of the true pre-strain ϵ for steel 45:
 ○ – undeformed sample, × – deformed.



Встановили, що зі збільшенням попередньої локальної деформації до 46% його концентрація зростає у 20 разів, а зі зростанням пружно-пластичної не змінюється і досягає насичення. Розчинений у металі водень зменшує його опірність деформуванню та питому енергію руйнування, що важливо під час розроблення технології однорідної фрагментації за динамічного навантаження.

ВИСНОВКИ

Напружено-деформований стан у матеріалі оцінено за одночасного пружно-пластичного деформування та дії водню МСЕ, а також експериментально методом ОЦКСЗ. Виявлено задовільну збіжність результатів за двома підходами. Концентрація поглинутого водню залежить від попередньої пружно-пластичної деформації. Зі збільшенням локальної деформації до 46% вона зростає до 52 ppm.

Робота виконана за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту № 2023.04/0105 “Розроблення технології заданої фрагментації оболонкових конструкцій за динамічного навантаження”.

1. 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.

2. *Андрейків О., Гембара О.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 346 с.
3. *Influence of hydrogen on the fracture resistance of pre- strained steam generator steel 22K / Maciej Dutkiewicz, Oksana Hembara, Yaroslav Ivanytskyi, Mykola Hvozdiuk, Olha Chepil, Mykhailo Hrynenko, and Nazar Hembara // Materials.* – 2022. – **15**, № 19. – Article number 6596. <https://doi.org/10.3390/ma15196596>
4. *Gavriljuk V. G., Shyvaniuk V. M., and Teus S. M.* Hydrogen-dislocation interaction in relation to hydrogen embrittlement and enhanced plasticity of metals // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2024. – **50**, Part A. – P. 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.303>
5. *Disbonding of austenitic stainless steel cladding following high-temperature hydrogen service in hydro processing applications / Yaroslav Ivanytskyi, Oksana Hembara, Mykola Hvozdiuk, Olha Chepil, and Mykhailo Hrynenko // EasyChair Preprint № 6422.* – 2021. – 10 p. https://easychair.org/publications/preprint_open/JmGm
6. *Temperature-dependent hydrogen embrittlement of austenitic stainless steel on phase transformation / Y.-H. Choi, J. H. Lee, S.-M. Kim, D.-H. Lee, H.-T. Kim, J.-H. Kim, M. Kim, S.-K. Kim, J.-M. Lee // Metals.* – 2023. – **13**, № 1. – P. 35. <https://doi.org/10.3390/met13010035>
7. *Modeling the effect of hydrogen charging at elevated temperatures on the strength of NPP steam generator pipes steel / Ya. L. Ivanytskyi, M. M. Hvozdiuk, D. V. Klymenko, M. V. Hrynenko, and O. P. Maksymenko // Materials Science.* – 2023. – **58**, № 4. – P. 453–459.
8. *Bak S. H., Kim S. S., and Lee D. B.* Effect of hydrogen on dislocation structure and strain-induced martensite transformation in 316L stainless steel // *RSC Adv.* – 2017. – **7**. – P. 27840–27845. <https://doi.org/10.1039/C7RA01053B>
9. *Panasyuk V. V., Ivanytskyi Ya. L., and Hembara O.* Assessment of hydrogen effect on fracture resistance under complex-mode loading // *Engin. Fract. Mech.* – 2012. – **83**. – P. 54–61.
10. *Wang Y., Wu X., and Wu W.* Effect of α' martensite content induced by tensile plastic pre-strain on hydrogen transport and hydrogen embrittlement of 304L austenitic stainless steel // *Metals.* – 2018. – **8**, № 9. – Article number 660. <https://doi.org/10.3390/met8090660>
11. *Effect of hydrogen concentration in metal on residual durability of defected pipelines / I. Dmytrakh, A. Syrotyuk, O. Hembara, M. Hrynenko // Proc. Struct. Integrity.* – 2024. – **59**. – P. 74–81.
12. *Durbin D. J. and Malardier-Jugroot C.* Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2013. – **38**, Is. 34. – P.14595–14617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.058>
13. *Digital image correlation technique for thin beam specimen deformation and material moduli of elasticity measurements / O. P. Maksymenko, O. M. Sakharuk, B. D. Ilchyshyn, and T. I. Polovynko // Proc. of 5th Int. Conf. “Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity” (June 24–27, 2014, Lviv, Ukraine) / Ed. V. V. Panasyuk.* – Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2014. – 880 p.
14. *Blaber J., Adair B., and Antoniou A.* Ncorr: Open-source 2D digital image correlation matlab software // *Exp. Mech.* – 2015. – **55**. – P. 1105–1122.

Одержано 23.07.2024