

Referenciák

1. Adamovich, Z. 2017. A posztindusztriális társadalom elmélete mint a tudásgazdaság módszertani alapja. *Földrajz és turizmus* 4: 275 - 280.
2. Bartoshuk, O. 2011. A turisztikai ipar fejlődésének modelljei (külföldi tapasztalatok). *Állam és régiók. Sorozat: Közgazdaságtan és vállalkozói szellem* 2: 62 - 68.
3. White, S. 2016. Az idegenforgalmi szolgáltatások fejlesztésének stratégiai prioritásai Ukrajnában és versenyképességük növelésének kilátásai a világpiacon. *Ukrajna fejlesztési stratégiája* 1: 17 - 23.
4. Bozhko, L. 2014. Az ipari turizmus szerepe a mobilitás fokozásában és a technológiák humanizálásában Ukrajnában. *NTU "KhPI" Értesítő. Sorozat: A tudomány és a technika története* 30 (1073): 28.
5. Danilchuk, V. 2009. A turisztikai tevékenységek koncepciójának és mechanizmusának kialakulásának előfeltételei a megmosott területen. *Ipari közgazdaságtan* 1: 208 - 2010.
6. Shramko, Ya., Kazakov, V. 2013. *Ipari turizmus: realitások és kilátások: Az Első Nemzetközi Tudományos és Gyakorlati Fórum közleményei*. Krivij Rih: Szerk. R. Kozlov.
7. Kazakov, V. 2006. Technogén turizmus a természetgazdálkodás rendszerében. *Ökológia és racionális természetgazdálkodás: tudományos munkák gyűjteménye*. Sumy: Sumy Pedagógiai Egyetem.
8. Kulesh, V. 2010. Az ipari turizmus fejlődésének kilátásai a világon és Ukrajnában. *A DITB Értesítője* 14: 90 - 95.
9. Lobanova, A. 2017. Az öko-ipari turizmus mint társadalmi-aktivitási gyakorlat: a koncepció feltárása. *Társadalmi technológiák: az elmélet és a gyakorlat aktuális kérdései* 76: 94 - 105.
10. A Turisztikai Világszervezet hivatalos oldala. UNWTO 2<http://www2.unwto.org/ru>.
11. Patsyuk, V. 2008. Az ipari turizmus és fejlődésének kilátásai Ukrajnában. *A Vinnytsia Állami Pedagógiai Egyetem tudományos jegyzetei elnevezve M. Kotsyubynsky* 15: 82 - 85.
12. Sviridova, N. 2010. Az ipari turizmus szerepe és jelentősége a régió társadalmi-gazdasági fejlődésében. *Ukrán magazin – XXI* 9 – 10: 30 - 32.
13. Sorochan, V. 2015. Az ipari turizmus lényegének meghatározása. *A Nemzetközi Bölcsészettudományi Egyetem Tudományos Közlönye* 10. <http://www.vestnik-econom.mgu.od.ua/journal/2015/11-2015/10.pdf>.

УДК 539.4(045)**ДО РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНЬ ВІД ВОДНЮ В МЕТАЛЕВИХ
КОНСТРУКЦІЯХ**

Стащук М.Г., Івасик Г.В., Лазар В.Ф., Стащук Н.М.

TO CALCULATION OF HYDROGEN STRESSES IN METAL STRUCTURES

Stashchuk Mykola, Ivasyk Halyna, Lazar Vasily, Stashchuk Nazar

Проблема оцінки основних інженерних параметрів (міцності, надійності і т. п.) металевих конструкцій, які зазнають корозійного впливу при одночасній дії механічних силових факторів, на даний момент є актуальною проблемою промислової експлуатації. Мало вивченими ще залишаються питання взаємовпливу водню та напружень в металоконструкціях. З наводненням металевого тіла змінюються лінійні розміри його елементів та об'єм. Водночас зміна об'єму тіла, за певних умов, викликає внутрішні напруження. Приймаємо, що взаємодія між атомами водню незначна. Потрібно встановити напружено-деформований стан металевого тіла, обумовлений концентрацією водню у ньому.

Ключові слова: конструкції; деформації; напруження; концентрація водню; метод скінченних елементів; суцільний циліндр; циліндричний зразок з виточкою.

The problem of estimating the basic engineering parameters (strength, reliability, etc.) of metal structures that are subject to corrosion under the simultaneous action of mechanical force factors, is currently an urgent problem of industrial operation. The interaction of hydrogen and stresses in metal structures is still poorly studied. When a metal body is flooded, the linear dimensions of its elements and volume change. At the same time, changes in body volume, under certain conditions, cause internal tensions. We assume that the interaction between hydrogen atoms is insignificant. It is necessary to establish the stress-strain state of the metal body due to the concentration of hydrogen in it.

Key words: constructions; deformation; tension; hydrogen concentration; finite element method; solid cylinder; cylindrical sample with a recess.

Водень у металевих конструкціях впливає на їхню міцність та довговічність. Особливість впливу водню на ці властивості полягає у безперешкодній його проникності через решітку та кристалічну ґратку металу. Також атоми водню у металах викликають розширення їхньої кристалічної ґратки [1]. Дослідження наводнювання та зневоднювання металів вказують на виникнення водневих концентраційних неоднорідностей [2], які ініціюють у металах напруження від зміни концентрації водню. Тому врахування внутрішніх напружень водневого характеру є актуальним для розвитку сучасних технологій під час проектування конструкцій, які експлуатуються в умовах взаємодії з воденьвмісними середовищами. Слід зауважити, що в таких дослідженнях, як правило, приділяли увагу односторонньому впливу механічних напружень на розподіл концентрації водню [3-6]. Водночас вдосконалення вказаних розробок вимагає детальних досліджень напружено-деформованого стану, обумовленого зміною концентрації водню у металах. В роботі [7] подано оцінку поля напружень, викликаного дифундованими атомами водню у металевому суцільному циліндрі. Підхід, який запропоновано в цій роботі, годиться для оцінки поля напружень для нескінченних тіл. В даній роботі запропоновано методику оцінки поля напружень для скінченних тіл.

Вихідні рівняння та схема розв'язання задачі. За наводнення металевого тіла змінюються лінійні розміри його елементів та об'єм [2]. Кожна зміна об'єму тіла за певних умов викликає внутрішні напруження. Вважаємо, що взаємодія між атомами водню незначна. Встановлюватимемо напружено деформований стан металевого тіла, який обумовлений зміною концентрації водню у ньому.

Повне деформування матеріалу при зміні в ньому концентрації водню на величину C_H схематично зображено на рис. 1.

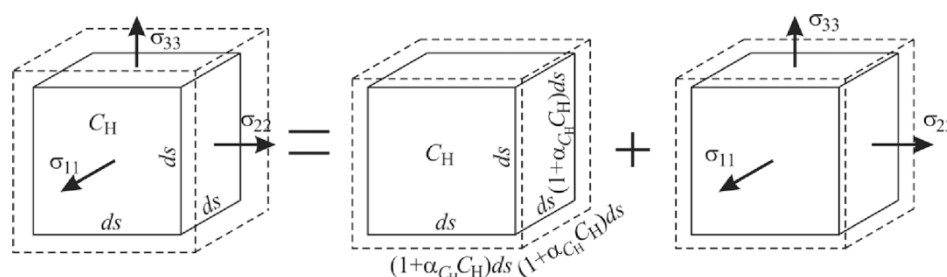


Рис.1. Схема повних деформацій з врахуванням водневих напружень

Як видно із цього рисунка ребро паралелепіпеда довжини ds матиме нову довжину $(1 + \alpha_{C_H} C_H) ds$. Параметр α_{C_H} є коефіцієнтом концентраційного розширення [2]. Для

ізотропного однорідного тіла α_{C_H} не залежить від напрямку елемента ds . Якщо також припустити, що α_{C_H} не залежить від величини концентрації, то він буде сталою величиною. В цьому випадку початковий нескінченно малий прямокутний паралелепіпед залишається прямокутним. Тобто видовження у всіх напрямках матимуть однакові значення. Зміна концентрації водню на величину C_H за проміжок часу Δt приведе до наступного приросту водневих деформацій

$$\Delta \varepsilon_{ij}^H = \alpha_{C_H} C_H = \alpha_{C_H} [C(t + \Delta t) - C(t)], \quad i, j = 1, 2, 3; \quad \varepsilon_{ij}^H = 0 \text{ при } i \neq j. \quad (1)$$

За законом суперпозиції приріст повних деформацій рівний сумі приростів деформацій, викликаних зміною концентрації водню та деформацій, обумовлених зовнішніми навантаженнями

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^P + \Delta \varepsilon_{ij}^H. \quad (2)$$

Розподіл концентрації водню у матеріалі обчислюватимемо на основі розв'язку рівняння Фіка, яке враховує вплив градієнта механічних напружень на дифузію водню [4-6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D\nabla C) + \nabla\left(\frac{DV_H}{RT} \nabla \sigma_h\right), \quad (3)$$

де $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ – оператор Гамільтона; D – коефіцієнт дифузії; R – універсальна газова постійна; T – абсолютна температура; V_H – парціальний молярний об'єм водню в металі; σ_h – гідростатична компонента тензора напружень в металі; t – часовий параметр.

Рівняння (3) розв'язуємо при таких початкових умовах

$$C(x, y, z, t)|_{t=0} = C_0, \quad (4)$$

На частині поверхні S_c задаємо значення концентрації водню C_0 , а на іншій частині S_N потік водню ϕ , причому $S_c \cup S_N = S$.

Обчислення методом скінченних елементів водневих напружень у металевому тілі обмежених розмірів. Одержати аналітично замкнутий розв'язок рівняння (3) для скінченних областей практично неможливо. Тому для його розв'язування використаємо метод скінченних елементів. Для цього розіб'ємо досліджуване тіло на n скінченних елементів.

Розв'язок рівняння (3) шукатимемо у вигляді розкладу по деяких базових функціях N_i :

$$C(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^m N_i(x, y, z) C_i(t) = [N]^T [C], \quad (5)$$

де N_i – функції форми [8]; m – кількість вузлів в елементі; $C_i(t)$ – значення концентрації водню у i -ому вузлі скінченного елемента. Тобто

$$[N]^T = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_m], [C]^T = [C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_m] \quad (6)$$

Після запису концентрації водню у вигляді (5) та нескладних математичних перетворень отримаємо глобальні скінченно елементні рівняння для обчислення концентрації водню у вузлах скінченних елементів:

$$[M] \left[\frac{\partial C}{\partial t} \right] + [K_H][C] = [F] \quad (7)$$

де $[M]$ і $[K_H]$ – відповідно матриці ємкості концентрації та дифузійності; $[F]$ – вектор потоку дифузії.

Слід відзначити, що матриці $[M]$, $[K_H]$ та вектор $[F]$ обчислюються на основі таких же матриць для кожного елемента досліджуваного тіла. Їх можна обчислити згідно співвідношень

$$\begin{aligned} [M^e] &= \iint_{V^{(e)}} [N]^T [N] dV, \quad [K_H^e] = [K_1^e] + [K_2^e], \quad [K_1^e] = D \iiint_{V^{(e)}} [B]^T [B] dV, \\ [K_2^e] &= -\frac{DV_h}{RT} \iiint_{V^{(e)}} [B]^T [B] [\sigma_h] [N] dV, \quad [F^e] = -\oint_{S_N^{(e)}} [N]^T \Phi dS, \end{aligned} \quad (8)$$

де $V^{(e)}$ – об'єм елемента; $S_N^{(e)}$ – поверхня елемента, через яку проходить потік водню; $[B]$ – матриця диференціювання [8]; $[\sigma_h]$ – вектор, який містить величини гідростатичних напружень у вузлах елемента.

Запишемо рівняння (7) у наступному вигляді:

$$[M] \left[\frac{\partial C}{\partial t} \right] + [K_1][C] = [F] - [K_2][C] \quad (9)$$

де матриці $[K_1]$, $[K_2]$ – складені на основі відповідних матриць для елементів $[K_1^e]$ та $[K_2^e]$.

Згідно з роботою [8] рівняння (9) запишемо у наступному вигляді

$$\begin{bmatrix} M_{cc} & M_{ca} \\ M_{ac} & M_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial C_c / \partial t \\ \partial C_a / \partial t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{1cc} & K_{1ca} \\ K_{1ac} & K_{1aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_c \\ C_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_c \\ F_a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{2cc} & K_{2ca} \\ K_{2ac} & K_{2aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_c \\ C_a \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де індекс "с" асоціюється з відомими концентраціями (чи температурами), а індекс "а" – з невідомими. Якщо вважати, що величини C_c не залежать від часу, то невідомі значення концентрації водню C_a (при наступних викладках індекс "а" опускатимемо) можна знайти із наступного рівняння

$$[M_{aa}] \left[\frac{\partial C}{\partial t} \right] + [K_{1aa}][C] = [F_a] - [K_{1ac}][C_c] - [K_{2ac}][C_c] - [K_{2aa}][C] \quad (11)$$

Для розв'язування рівняння (9) використаємо обернений метод Ейлера [8]. Для цього запишемо

$$\left[\frac{\partial C(t)}{\partial t} \right] \cong \frac{[C(t + \Delta t)] - [C(t)]}{\Delta t} = \frac{[C]_{t+\Delta t} - [C]_t}{\Delta t} \quad (12)$$

Також вважаємо

$$[K_{2ac}]_{t+\Delta t} [C_c] = [K_{2ac}]_t [C_c], [K_{2aa}]_{t+\Delta t} [C] = [K_{2ac}]_t [C] \quad (13)$$

Враховавши співвідношення (12) і (13), рівняння (11) запишемо так:

$$\left[\frac{[M_{aa}]}{\Delta t} + [K_{aa}] \right] [C]_{t+\Delta t} = [F_a] + \left(\frac{[M_{aa}]}{\Delta t} - [K_{2aa}] \right) [C]_t - ([K_{1ac}] + [K_{2ac}]_t) [C_c] \quad (14)$$

Рівняння (14) дає можливість обчислити значення дифузії водню у досліджуваному тілі. На першому кроці при $t = \Delta t$, знаючи вектори $[C_c]$, $[C]_{t=0}$, $[K_{2aa}]_{t=0}$ та $[K_{2ac}]_{t=0}$, можна легко обчислити вектор $[C]_{\Delta t}$. При обчисленні $[K_{2aa}]_{t=0}$ та $[K_{2ac}]_{t=0}$ приймаємо, що гідростатичні напруження у вузлах скінченних елементів рівні нулю. При обчисленні концентрації водню при $t = 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, lt$ потрібно знати значення гідростатичних напружень у вузлах при $t = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, (l-1)t$. Гідростатичні напруження визначаємо описаним нижче чином.

Принцип віртуальної роботи для квазістатичних рівнянь рівноваги у покроковому формулюванні для моменту часу $t + \Delta t$ можна записати так (див[9]):

$$\int_V \delta([\varepsilon]^T)^{t+\Delta t} [\Delta\sigma] dV = \int_{\Gamma} \delta([u]^T)^{t+\Delta t} [\Delta p] d\Gamma + \int_{\Gamma} \delta([u]^T)^{t+\Delta t} \{p\}^t d\Gamma - \int_V \delta([\varepsilon]^T)^{t+\Delta t} ([\sigma])^t dV, \quad (15)$$

де $[\Delta\sigma], [\Delta p]$ відповідно вектори приростів напружень Коші та поверхневих зусиль за проміжок часу Δt ; $\delta([\varepsilon])^{t+\Delta t}$ і $\delta([u])^{t+\Delta t}$ віртуальні змінні повних деформацій та переміщень в момент часу $t + \Delta t$; V і Γ об'єм та поверхня тіла, відповідно.

Для розв'язування задачі використовуємо метод скінченних елементів. Розбиття, досліджуваної області на скінченні елементи буде таке ж як і для рівняння (14). Для цього розіб'ємо область інтегрування V на скінченні елементи. Тоді вектори полів переміщень запишемо через функції форми N_i та вектор вузлових переміщень $[u]$. Якщо врахувати співвідношення (2), то приріст напружень можна обчислити так:

$$[\Delta\sigma] = [D][B][\Delta u] - [D][\Delta\varepsilon^H], \quad (16)$$

де $[D]$ – матриця пружності.

При наступних обчисленнях вважаємо, що вектори $[p]$ та $[\Delta p]$ рівні нулю. Після нескладних перетворень та врахування (16), отримаємо скінченноелементне рівняння для визначення $[\Delta u]$ в момент часу $t + \Delta t$

$$[K][\Delta u]_{t+\Delta t} = [F_H]_{t+\Delta t} + [F_S]_t, \quad (17)$$

де матриця жорсткості $[K]$ та вектори $[F_H]_{t+\Delta t}$ і $[F_S]_t$ для досліджуваної області обчислюємо на основі таких же значень для елементів

$$[K] = \int_{V^e} [B]^T [D][B] dV, \quad [F_H]_{t+\Delta t} = \int_{V^e} [B]^T [D][\varepsilon_H]_{t+\Delta t} dV, \quad [F_S]_t = \int_{V^e} [B]^T [\sigma]_t dV \quad (18)$$

Знайшовши із (17) $[\Delta u]_{t+\Delta t}$, із (16) легко знаходимо значення $[\Delta \sigma]$. Тепер для моменту часу $t + \Delta t$ запишемо

$$[\sigma]_{t+\Delta t} = [\sigma]_t + [\Delta \sigma] \quad (19)$$

Використовуючи числові розв'язки скінченноелементних рівнянь (14) та (17), знаходимо напруження, які спричинені зміною концентрації водню у матеріалі в момент часу $t = 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, lt$.

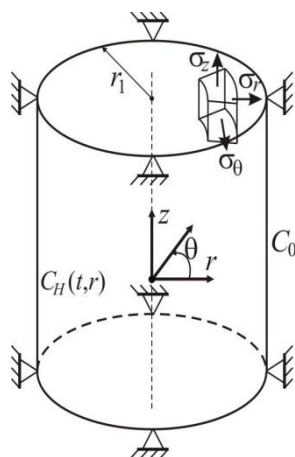


Рис.2
Суцільний
циліндр

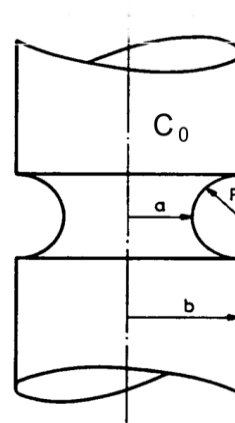


Рис.3
Циліндр
з виточкою

Циліндричні зразки. Використання запропонованої методики обчислення напружень, спричинених зміною концентрації водню, проілюструємо на циліндричних зразках. Перший зразок – це суцільний циліндр радіуса $r_1 = b$ та довжини $2h$ (рис. 1). Другий зразок – це циліндр радіуса $r_1 = b$ та довжини $2h$, який посередині має виточку радіуса R , а радіус перемички рівний a (рис.2). Відзначимо, що для зразків 1 та 2 розглядаються випадки, коли вони є вільні та защемлені на одному з кінців. У випадку вільних від закріплень зразків, розглядаємо лише їх половину. Також при розрахунках вважаємо, що потік водню є нульовим. Граничні та початкові умови для всіх випадків наступні:

$$\begin{aligned} C(r, z, 0) &= C_0, \text{ при } r, z \in S_1, \\ C(r, z, t) &= C_c, \text{ при } r, z \in L_1 \end{aligned} \quad (20)$$

де S_1 – площа осевого перерізу кожного з циліндрів; S_2 – лінії, що утворені осевим перерізом поверхні та торця (незакріпленого) циліндра.

Обчислення проводили для двох випадків граничних умов: наводнення ($C_0 = 0, C_c = 5 \text{ mol/m}^3$) та зневоднення ($C_0 = 5 \text{ mol/m}^3, C_c = 0$) зразків. Надалі всі обчислення проведені за наступних параметрів: модуль Юнга $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, $D = 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, $R = 8,31 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$, $V_H = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{mol}$, $T = 295 \text{ К}$, $a = 5 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$, $R_i = 2.5 \text{ мм}$, $h = 40 \text{ мм}$, $h_i = 9 \text{ мм}$.

При розбитті досліджуваних областей на скінченні елементи використовуємо чотирьохвузлові лінійні скінченні елементи. Для розв'язування рівнянь (14) та (17) на алгоритмічній мові FORTRAN було створено комплекс програм, який дозволяє знаходити зміну концентрації водню та відповідний приріст напружень для довільного моменту часу. Для апробації програми при обчисленні концентрації водню було використано замкнутий розв'язок [7] для наводнювання та зневоднювання довгого циліндра. Як видно із рис. 4 та 5, між результатами, що одержані з допомогою програми та [7], спостерігається співпадіння результатів з малими відхиленнями.

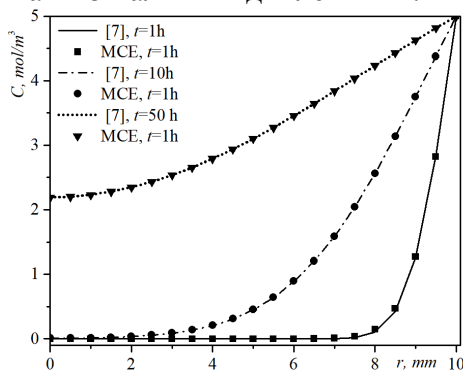


Рис. 4. Порівняння результатів числового та аналітичного розв'язування рівняння (14) при наводнюванні довгого циліндра

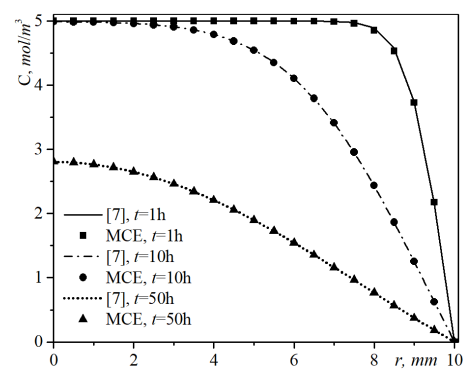


Рис. 5. Порівняння результатів числового та аналітичного розв'язування рівняння (14) при зневоднюванні довгого циліндра

Для суцільного циліндра (рис. 2) обчислення проводили для двох випадків. У першому випадку вважається, що L_i складається із лінії, яка утворюється при перетині бічної поверхні та торців. Тобто в цьому випадку можна вважати, що $u_z(r, 0, t) = 0$. В іншому випадку вважається, що циліндр заземлений у торці $z = -h$. Також вважається, що через цей торець не відбувається наводнювання (зневоднювання). В цьому випадку $u_r(r, 0, t) = u_z(r, 0, t) = 0$.

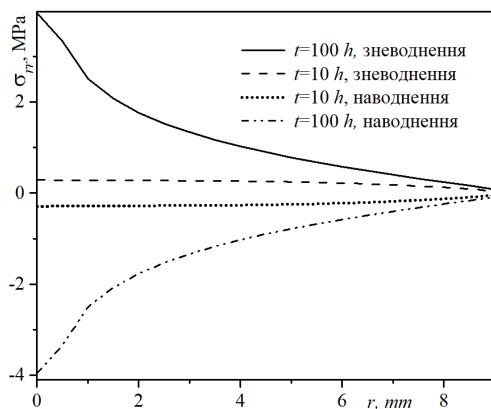


Рис. 6. Розподіл напружень σ_{rr} при наводнюванні та зневоднюванні суцільного циліндра в перерізі $z=0$ при $t=10 \text{ h}$ та $t=100 \text{ h}$.

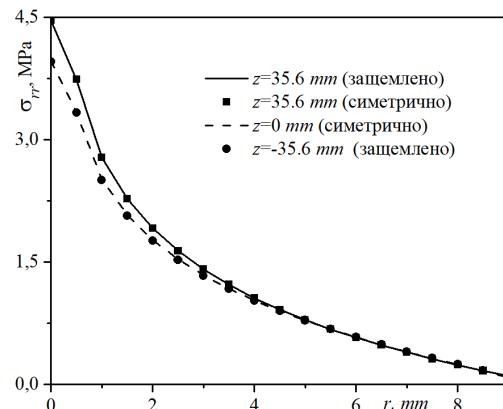


Рис. 7. Характер зміни розподілу напружень σ_{rr} в різних перерізах заземленого та незаземленого циліндрів для $t=100 \text{ h}$.

Результати числових експериментів. Рівняння (14) та (17) розв'язували з кроком $\Delta t=1$ хвилини. Незащемлений циліндр розбивали на 900 чотиривузлових елементів (966 вузлів). Відповідно для защемленого циліндра 1800 елементів (1911 вузлів). Обчислення проводили для часу наводнювання (зневоднювання) протягом 100 годин. На рис.6 показано розподіл напружень σ_r при наводнюванні та зневоднюванні суцільного незащемленого циліндра в перерізі $z=0$ при $t=10 h$ та $t=100 h$. Звідси видно, що напруження σ_r при наводнюванні та зневоднюванні є рівними по абсолютній величині і відрізняються тільки знаком. Аналіз одержаних числових результатів показав такі ж результати для інших напружень при всіх часах. Тому, далі при розгляді отриманих результатів розглядаємо тільки результати для зневоднювання.

На рис. 7 подано характер зміни розподілу напружень σ_r для різних перерізів як защемленого, так і незащемленого циліндрів. Аналіз результатів, поданих на цьому рисунку, вказує на те, що величина і поведінка цих напружень практично не залежить від перерізу і однакова для защемленого та незащемленого циліндрів. Аналіз одержаних цифрових результатів показує таку ж поведінку напружень $\sigma_{\theta\theta}$. Хоча, у випадку напружень σ_z такого співпадіння не спостерігається.

Аналогічні обчислення було проведено для циліндра з виточкою, яка розміщена посередині (рис. 3). В цьому випадку $h_2=h$. При цьому незащемлений циліндр був розбитий на 1022 чотирьохвузлові елементи (1098 вузлів), а защемлений на 2058 елементів (2186 вузлів).

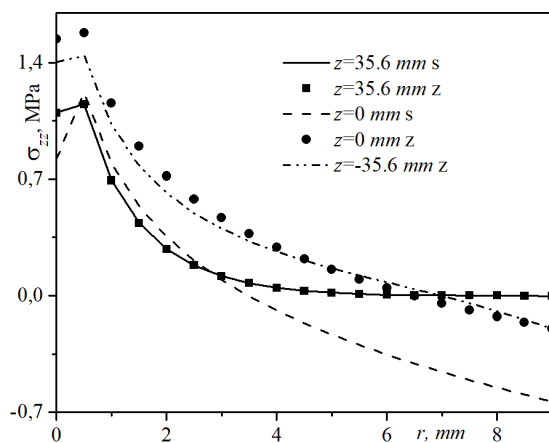


Рис. 8. Характер зміни розподілу напружень σ_{zz} в різних перерізах защемленого та незащемленого циліндрів $t=100 h$.

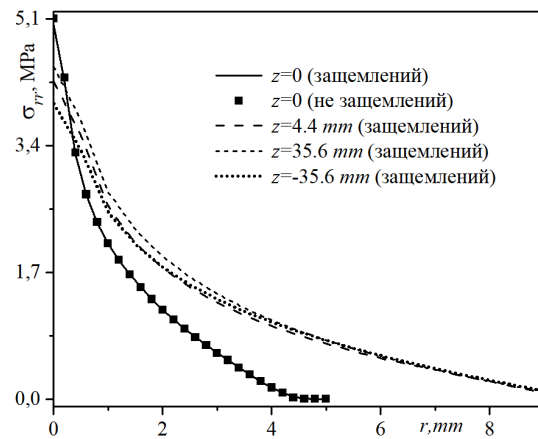


Рис. 9. Порівняння розподілу напружень σ_{rr} для защемленого та незащемленого циліндрів з виточкою у різних перерізах при $t=100 h$.

Аналізуючи графічні дані, подані на рис. 9, можна зробити висновок: характер розподілу напружень σ_r в перерізах, які знаходяться поза виточкою практично однаковий, як і для циліндра без виточки. В перерізі $z=0$ ці напруження для циліндра з виточкою суттєво відрізняються від напружень в інших перерізах. Але для защемленого і незащемленого циліндрів ці напруження є однаковими. Це, напевно, пов'язано з тим, що в цьому місці радіус циліндра є меншим від величини радіуса в інших перерізах і зневоднення тут проходить швидше.

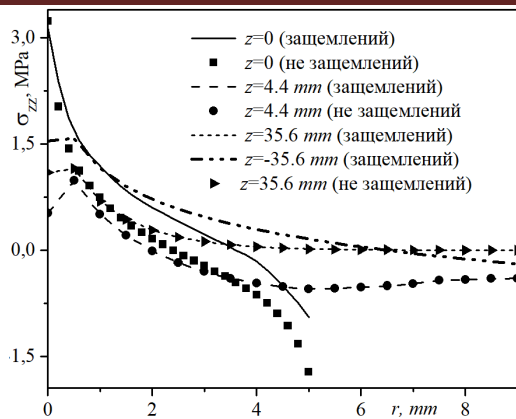


Рис. 10. Порівняння розподілу напружень σ_{zz} для защемленого та незащемленого циліндрів з виточкою у різних перерізах при $t=100$ h.

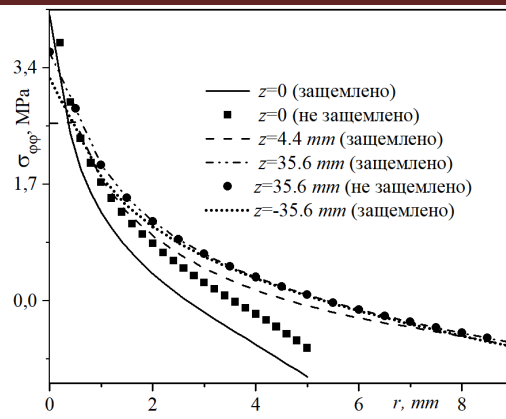


Рис. 11. Порівняння розподілу напружень $\sigma_{\phi\phi}$ для защемленого та незащемленого циліндрів з виточкою у різних перерізах при $t=100$ h.

На відміну від напружень σ_{rr} напруження σ_{zz} та $\sigma_{\phi\phi}$ в цьому перерізі є різними за величиною для защемленого та незащемленого циліндрів (рис.10 та рис.11). Із графічних даних, поданих на рис. 10 та рис. 11, можна зробити висновок, що для всіх інших перерізів ці напруження є однаковими для обох циліндрів. Але напруження $\sigma_{\phi\phi}$ для перерізів, які не відносяться до виточки практично не відрізняються. Відносно напружень σ_{zz} цього сказати не можна. Як видно із рис. 10 ці напруження відрізняються за величиною для різних перерізів.

Для одержання наведеного графічного матеріалу та відповідних розрахунків використано власну комп'ютерну програму [10], створену поширенням теоретичних результатів для суцільного безмежного циліндра [3,7,8,11] на дослідження експериментальних зразків циліндричної форми.

Отже, записано та встановлено аналітичні співвідношення для розрахунку компонент напружень та деформацій в металах з наявними в них концентраціями водню. В результаті проведено відповідні числові розрахунки розподілу таких компонент та концентрації водню всередині циліндра кінцевої довжини, а також - від часу його розводнення чи наводнення. В процесі розводнення циліндричного зразка всередині його спостерігається стискальна зона, а біля поверхні присутні розтягальні напруження. За наводнення картина є протилежною (всередині зразка присутня рівномірна розтягальна зона). Біля поверхні циліндричного зразка стискальні напруження стають інтенсивнішими.

Список використаних джерел

1. Mathematical modeling of hydroelastic effect of slowing down of diffusion processes in metal-hydrogen system / Zh. L. Glukhova, V. A. Goltsov, T. A. Schegoleva, E. N. Lyubimenko, R. V. Kotelva // Int. J. Nucl. Hydrogen Prod. App. – 2008. – № 4. – P. 334-342.
2. Водородные концентрационные напряжения: природа, экспериментальные проявления, значимость для техники / В. А. Гольцов, Ж. Л. Глухова, Е. Н. Любименко, Т. А. Щеголева // Наук. пр. ДонНТУ. Металургія. – 2009. – Вип. 11(159). – С. 165-173.
3. Staschuk M. H. Mutual influence of stress-strain state and hydrogen concentration in the metal-hydrogen system / M. H. Staschuk // Material Science. – 2011. – 47, №4. – P. 400-508.
4. Influence of the stress-strain state on the distribution of hydrogen concentration in the process zone system / V. V. Panasyuk, Ya. L. Ivanyts'kyi, O. V. Hembara, V. M. Boiko // Material Science. – 2014. – 50, №3. – P. 315-323.
5. Krom A. H. M. Hydrogen transport near a blunting crack tip / A. H. M. Krom, R. W. J. Koers, A. Bakker // J. Mech. Phys. Solids. – 1999. – 47, №4. – P. 971-992.
6. Numerical analysis of hydrogen diffusion problems using the finite element method / H. Kanayama, T. Shingoh, S. Ndong-Mefane et al. // J. Theoretical and Applied Mechanics Japan. – 2008. – 56. – P. 389-400.

7. Staschuk M. H. Influence of hydrogen concentration on the stresses in a solid metallic cylinder / M. H. Staschuk // *Material Science*. – 2017. – 53, №6. – P. 824-830.
8. Hutton D. W. *Fundamentals of finite element analysis* / D. W. Hutton. – New York: McGraw-Hill, 2004. – 494 p.
9. Filho O. J. A. G. Creep-rupture behavior of a cruciform specimen under equal triaxial tension / O. J. A. G. Filho // *Int. J. Mech. Sci.* – 1992. – 34, №10. – P. 769-783.
10. Бойко В. М. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку напружено-деформованого стану матеріалів, які знаходяться у воденьвмісному середовищі під дією температури» (STRES_HYDТО_TEMP) / В. М. Бойко, Я. Л. Іваницький, М. Г. Стащук // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 95246 видане Міністерством розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України 10.01.2020 р.
11. Напруження від водню в металевих конструкціях / В. Ф. Лазар, М. Г. Стащук, Г. В. Івасик, Н. М. Стащук // Сучасні тенденції розвитку науки і освіти в умовах поглиблення євроінтеграційних процесів: збірник тез доповідей за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції (м. Мукачєво, 14 – 15 травня 2020 року). – Мукачєво: Вид. МДУ, 2020. – С. 315-317.

References

1. Glukhova, Zh. L., Goltsov, V. A., Schegoleva, T. A., Lyubimenko, E. N., and R. V. Kotelva. 2008. Mathematical modeling of hydroelastic effect of slowing down of diffusion processes in metal–hydrogen system. *Int. J. Nucl. Hydrogen Prod. App* 4: 334-342.
2. Hol'tsov, V. A., Hlukhova, Zh. L., Lyubymenko, E. N., and T. A. Shchegoleva. 2009. Vodorodnye kontsentratsyonnye napryazhenyya: pryroda, eksperymental'nye proyavlenyya, znachymost' dlya tekhniky [Hydrogen concentration stresses: nature, experimental manifestations, significance for technology]. *Science. ave. DonNTU. Metallurgy* 11(159):165-173.
3. Staschuk, M. H. 2011. Mutual influence of stress-strain state and hydrogen concentration in the metal-hydrogen system. *Material Science* 47, 4: 400-508.
4. Panasyuk, V. V., Ivanyts'kyi, Ya. L., Hembara, O. V., and V. M. Boiko. 2014. Influence of the stress-strain state on the distribution of hydrogen concentration in the process zone system. *Material Science* 50, 3: 315-323.
5. Krom, A. H. M. Koers, R. W. J., and A. Bakker. 1999. Hydrogen transport near a blunting crack tip. *J. Mech. Phys. Solids* 47, 4: 971-992.
6. Kanayama, H., Shingoh, T., and S. Ndong-Mefane et al. 2008. Numerical analysis of hydrogen diffusion problems using the finite element method. *J. Theoretical and Applied Mechanics Japan* 56: 389-400.
7. Staschuk, M. H. 2017. Influence of hydrogen concentration on the stresses in a solid metallic cylinder. *Material Science* 53, 6: 824-830.
8. Hutton, D. W. 2004. *Fundamentals of finite element analysis*. New York: McGraw-Hill.
9. Filho, O. J. A. G. 1992. Creep-rupture behavior of a cruciform specimen under equal triaxial tension. *Int. J. Mech. Sci* 34, 10: 769-783.
10. Boiko, V. M., Ivanytskyi, Ya. L., and M. H. Stashchuk. Komp'uterna prohrama «Prohrama rozrakhunku napruzhenno-deformovanoho stanu materialiv, yaki znakhodiatsia u vodenvmisnomu seredovyshchi pid diieiu temperatury» (STRES_HYDТО_TEMP) [Computer program "Program for calculating the stress-strain state of materials in a hydrogen-containing environment under the action of temperature" (STRES_HYDТО_TEMP)]. Certificate of registration of copyright to the work № 95246 issued by the Ministry of Economy, Trade and Agriculture of Ukraine on 10.01.2020.
11. Lazar, V. F., Stashchuk, M. H., Ivasyk, H. V., and N. M. Stashchuk. 2020. Napruzheniya vid vodnyu v metalevykh konstruktsiyakh [Voltages from hydrogen in metal structures]. Modern tendencies of development of science and education in the conditions of deepening of European



МУКАЧІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

89600, м. Мукачево, вул. Ужгородська, 26

тел./факс +380-3131-21109

Веб-сайт університету: www.msu.edu.ua

E-mail: info@msu.edu.ua, pr@mail.msu.edu.ua

Веб-сайт Інституційного репозитарію Наукової бібліотеки МДУ: <http://dspace.msu.edu.ua:8080>

Веб-сайт Наукової бібліотеки МДУ: <http://msu.edu.ua/library/>