

УДК 539.3

## ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ, ОБУМОВЛЕНИХ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ВОДНЮ У МЕТАЛІ

М. Г. СТАЩУК, М. І. ДОРОШ

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

З позицій теорії пружності сформульовано систему основних ключових рівнянь для визначення компонент напружень у металі, спричинених воднем. Основні рівняння записані для порожнистого циліндричного тіла та одержано відповідні розрахункові співвідношення. Обчислено компоненти тензора напружень, індукованих воднем у такому циліндрі.

**Ключові слова:** *напружено-деформований стан, водень, концентрація водню, порожнистий металевий циліндр.*

Проблема водню в металах в останні десятиріччя знаходиться у центрі уваги багатьох дослідників. Це пов'язано з його застосуванням у сучасних технологіях під час проектування деталей машин, конструкцій, споруд, а також створення матеріалів, які експлуатуються в умовах взаємодії з воденьвмісними середовищами чи безпосередньо контактують з ним.

Впроваджені у метали атоми водню розширюють їх кристалічну ґратку [1–3], зокрема, відомі експериментальні результати про її розширення під час розчинення водню у ніобії [4], алюмінії [5] та паладієвих сплавах [6].

За наводнювання або розводнювання металів, а також під впливом напруженого стану виникають концентраційні неоднорідності розподілу водню, які незалежно від причин появи зумовлюють внутрішні водневі напруження [1]. Тому необхідно їх враховувати в сучасних технологічних розробках, де першочерговими є розрахунки індукованих воднем напружень, характерних для термоядерних реакторів, газо- та нафтопроводів, різноманітних фільтрів та низки апаратів нафтохімічного виробництва. Отже, нехтувати поля водневих напружень, вивчаючи вплив водню на поведінку матеріалів, не варто. Частково такі дослідження уже виконували [1, 7, 8]. Однак приділяли увагу тільки односторонньому впливу механічних напружень на розподіл концентрації водню [9–11]. Біля концентраторів напружень вивчали [7, 8] взаємовплив концентрації водню та напружено-деформованого стану (НДС) із залученням лише гідростатичного тиску. Ці результати початкові та відіграють відповідну роль у розвитку водневої пружності матеріалів. Однак до сьогодні задача про визначення усіх компонент напружень та переміщень у металі від водню не вивчена. Тому, щоб вдосконалити такі розробки, слід дослідити НДС, обумовлений концентрацією водню в металах. Для вивчення впливу водню на метали необхідно оцінити поле напружень, спричинене дифундованими атомами водню. Цьому і присвячується це повідомлення. Розв'язання такої задачі дасть можливість уточнити відомі методи та підходи до оцінки надійності та довговічності наводнених матеріалів, або таких, що є основами конструкцій, які контактують з воденьвмісними середовищами.

**Формулювання задачі та основні ключові рівняння.** Розглянемо пружно-деформоване металеве тіло, під час наводнювання якого до деякої концентрації

---

*Контактна особа:* М. Г. СТАЩУК, e-mail: stashchuk@ipm.lviv.ua

водню змінюються його лінійні розміри та об'єм [1]. У свою чергу зміна об'єму тіла за певних умов може викликати внутрішні напруження. Коли воно деформується без перешкод, напруження від водню відсутні. Вважаємо також, що взаємодія між атомами водню незначна. Потрібно встановити НДС тіла, обумовлений концентрацією у ньому водню.

Якщо у тілі вона зміниться на величину  $C_H$ , то елемент завдовжки  $ds$  матиме нову довжину  $(1 + \alpha_{C_H} C_H) ds$  (рис. 1a). Так забезпечимо умову, коли окремі елементи об'єму не зустрінуть перешкод за розширення і, відповідно, не виникнуть концентраційні напруження. Величину  $\alpha_{C_H}$  називають коефіцієнтом концентраційного водневого розширення [1, 7, 8]. Якщо тіло ізотропне і однорідне, то він не залежить від напрямку та координат елемента  $ds$ .

За таких припущень початково прямокутний нескінченно малий куб, незалежно від зміни концентрації водню, залишається прямокутним. Видовження в усіх напрямках будуть однакові. Отже, зміна концентрації водню на величину  $C_H$  призведе до деформацій:

$$\varepsilon_{11}^H = \varepsilon_{22}^H = \varepsilon_{33}^H = \alpha_{C_H} C_H, \quad \varepsilon_{12}^H = \varepsilon_{23}^H = \varepsilon_{13}^H = 0. \quad (1)$$

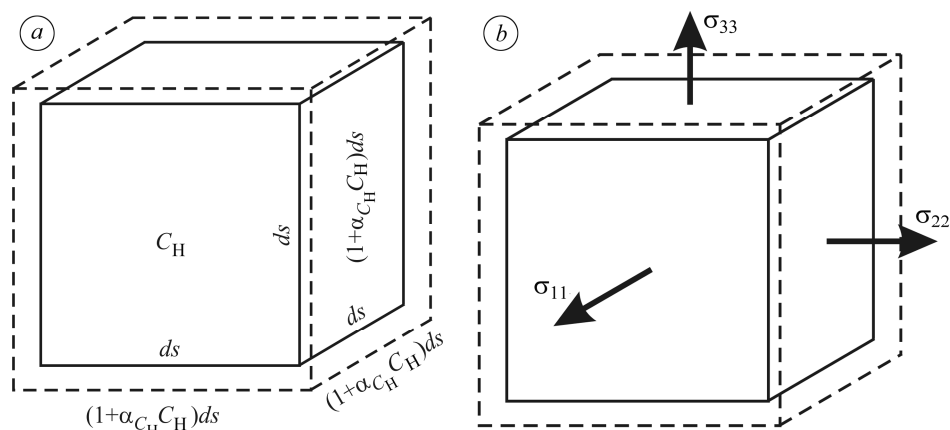


Рис. 1. Деформування елементарного об'єму, обумовленого концентрацією водню  $C_H$  (a) та напруженнями  $\sigma_{ik}$  (b).

Fig. 1. Deformation of elementary volume caused by the concentration of hydrogen  $C_H$  (a) and stress  $\sigma_{ik}$  (b).

Оцінимо коефіцієнт  $\alpha_{C_H}$  за експериментальними результатами [12]. Позначимо через  $\Omega_H$  об'єм одного атома водню. За його попадання в деякий об'єм металу  $V$  дилатація (відносне об'ємне розширення)  $\delta_V = \Omega_H / V$ . Один атом водню у металі становить  $1 / N_A$  молей, де  $N_A$  – число Авогадро. Відповідно приріст концентрації водню  $C_H = (1 / N_A) / V$ . Так як слід тензора деформацій  $\varepsilon_{ii} = 3\alpha_{C_H} C_H$ , то з рівності  $\varepsilon_{ii} = \delta_V$  першою грубою оцінкою параметра  $\alpha_{C_H}$  стає співвідношення  $\alpha_{C_H} = \Omega_H N_A / 3$ . Наприклад, для радіуса іона водню  $r_H = 79$  ppm маємо  $\alpha_{C_H} = 4\pi r_H^3 N_A / 9 = 0,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$ . Оцінимо його також за формулою [8]  $\alpha_{C_H} = \varepsilon_{ii} / 3\Delta C = 0,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$ , де  $\varepsilon_{ii} = (V - V_0) / V_0 \approx 3(\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$ . Тут  $\lambda$  – параметр ґратки, що залежить від концентрації водню і заданий згідно з експериментальними даними [12].

Як бачимо, збіг теоретичного значення  $\alpha_{C_H}$  з експериментальним  $\epsilon$  в межах одного порядку. Отже, теоретична оцінка достовірна. Порядок коефіцієнта також збігається з відповідним за експериментальними результатами [13].

Елементи тіла, як правило, перешкоджають взаємним змінам об'єму. До того ж вважаємо, що воно піддане зовнішнім навантаженням. Тому у ньому виникають напруження  $\sigma_{ik}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) як від дії навантаження, так і від зміни концентрації водню на величину  $C_H$ , які обумовлюють додаткові видовження та зсуви згідно з класичною теорією пружності. Напруження  $\sigma_{ik}$  викликають деформації [14] (рис. 1b)

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{11}^P &= \frac{1}{2G} \left( \sigma_{11} - \frac{\nu}{1+\nu} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \right), & \epsilon_{12}^P &= \frac{\sigma_{12}}{2G} \\ \epsilon_{22}^P &= \frac{1}{2G} \left( \sigma_{22} - \frac{\nu}{1+\nu} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \right), & \epsilon_{23}^P &= \frac{\sigma_{23}}{2G} \\ \epsilon_{33}^P &= \frac{1}{2G} \left( \sigma_{33} - \frac{\nu}{1+\nu} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \right), & \epsilon_{13}^P &= \frac{\sigma_{13}}{2G} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Тут  $G$  – модуль зсуву;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Повні деформації – це сума деформацій через зміну концентрації водню (рівняння (1)) та напружень (2) в тілі, тобто

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^H + \epsilon_{ij}^P. \quad (3)$$

Якщо застосувати символ Кронекера  $\delta_{ij}$ , то рівняння (3) набуде вигляду

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \delta_{ij} \right) + \alpha_{C_H} + C_H \delta_{ij}. \quad (4)$$

Тепер, додаючи компоненти напружень  $\sigma_{ii}$  та деформацій  $\epsilon_{ii}$ , встановимо співвідношення зв'язку гідростатичних напружень  $\sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$  та об'ємного розширення  $\theta = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$ :

$$\theta = \frac{1-2\nu}{1+\nu} \frac{3\sigma}{2G} + 3\alpha_{C_H} C_H.$$

Кількісно індуковані воднем напруження у металі оцінюємо, досліджуючи плоску деформацію порожнистого циліндричного металевого тіла за наявності у ньому концентрації водню  $C_H$ .

**Плоска деформація порожнистого циліндра за дії водневих напружень.** Розглянемо плоску деформацію [14], породжену концентрацією водню  $C_H$  у такому циліндрі (рис. 2). Маємо три компоненти напружень  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ . Так як уздовж осі  $Oz$  умови для реалізації НДС незмінні та виконується симетрія відносно неї, то на основі виразів (3) або (4) можемо записати співвідношення, що пов'язують напруження і деформації, спричинені воднем. У полярній системі координат вони мають вигляд

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \alpha_{C_H} C_H, & \epsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] + \alpha_{C_H} C_H, \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \alpha_{C_H} C_H. \end{aligned} \quad (5)$$

Тут  $E$  – модуль Юнга.

Для плоскої деформації переміщення дорівнюватимуть нулю вздовж осі  $Oz$ . Тому  $\epsilon_z = 0$  і відповідно третє з рівнянь (5) буде:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - \alpha_{C_H} E C_H. \quad (6)$$

Підставимо співвідношення (6) у перші рівняння (5)

$$\varepsilon_r = \frac{1-\nu^2}{E} \left[ \sigma_r - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_\theta \right] + (1-\nu) \alpha_{C_H} C_H,$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1-\nu^2}{E} \left[ \sigma_\theta - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r \right] + (1-\nu) \alpha_{C_H} C_H$$

і розв'яжемо їх відносно напружень  $\sigma_r$  та  $\sigma_\theta$ . Одержимо:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-2\nu} \left( \varepsilon_r + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_\theta - \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_{C_H} C_H \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-2\nu} \left( \varepsilon_\theta + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_r - \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_{C_H} C_H \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Напруження  $\sigma_r$  та  $\sigma_\theta$  задовольняють умову рівноваги

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (8)$$

Внаслідок симетрії поля деформацій дотичне напруження  $\tau_{r\theta}$  рівне нулю. З урахуванням рівнянь (7) вираз (8) набуде вигляду

$$r \frac{d}{dr} \left( \varepsilon_r + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_\theta \right) + \frac{1-2\nu}{1-\nu} (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_{C_H} r \frac{dC_H}{dr}. \quad (9)$$

Якщо позначити через  $u$  радіальне переміщення, то компоненти деформацій

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}. \quad (10)$$

Підставимо ці вирази в рівність (9) і одержимо:

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d(ru)}{dr} - \frac{u}{r^2} \right] = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_{C_H} \frac{dC_H}{dr}.$$

Проінтегруємо останнє рівняння. Тоді

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_{C_H} \frac{1}{r} \int_{r_0}^r C_H r dr + A_1 r + \frac{A_2}{r}. \quad (11)$$

Тут  $r_0$  – радіус отвору у циліндрі вздовж осі  $Oz$ .

На основі співвідношень (7) та (10), беручи до уваги формулу (11), отримаємо такі вирази для компонент напружень:

$$\sigma_r = -\frac{\alpha_{C_H} E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \int_{r_0}^r C_H r dr + \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{A_1}{1-2\nu} - \frac{A_2}{r^2} \right), \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{\alpha_{C_H} E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \int_{r_0}^r C_H r dr - \frac{\alpha_{C_H} E C_H}{1-\nu} + \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{A_1}{1-2\nu} - \frac{A_2}{r^2} \right). \quad (13)$$

Також із рівняння (6) знаходимо:

$$\sigma_z = -\frac{\alpha_{C_H} E C_H}{1-\nu} + \frac{2\nu E A_1}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (14)$$

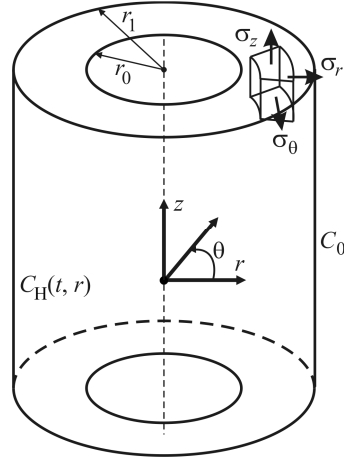


Рис. 2. Схема порожнистого циліндричного зразка.

Fig. 2. Scheme of a hollow cylindrical sample.

Оскільки поверхні порожнистого циліндра ( $r = r_0$  та  $r = r_1$ ) вільні від навантажень, то на внутрішньому та зовнішньому його криволінійних краях маємо:  $\sigma_r|_{r=r_0} = 0$  і  $\sigma_r|_{r=r_1} = 0$ . На основі цього із виразу (12) одержуємо:

$$A_1 = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{r_1^2 - r_0^2} \frac{\alpha_{C_H}}{1-\nu} \int_{r_0}^{r_1} C_H r dr, \quad A_2 = \frac{(1+\nu)r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \frac{\alpha_{C_H}}{1-\nu} \int_{r_0}^{r_1} C_H r dr. \quad (15)$$

Водночас важливі випадки, коли деформація  $\varepsilon_z$  та осьове зусилля рівні нулю.

Розв'язки (11)–(15) для плоскої деформації легко використати, якщо осьове зусилля циліндра  $F_z = 0$ . Щоб сумарне осьове зусилля дорівнювало нулю, потрібно до його основ прикласти нормальні зусилля, розподілені згідно з формулою (14). Однак, за принципом Сен-Венана, ці напруження змінюватимуться тільки поблизу основ циліндра. На достатній відстані від них додаткові осьові напруження  $\sigma'_z$  будуть сталі. Нехай вони рівні  $A$ . Для вибору  $A$  потрібно враховувати умову, за якої результуюче осьове зусилля у циліндрі рівне нулю.

Підрахуємо сумарне осьове напруження у порожнистому циліндрі, викликане зміною концентрації водню на величину  $C_H$ . Для цього проінтегруємо співвідношення (14):

$$\int_{r_0}^{r_1} \sigma_z 2\pi r dr = -\frac{2\pi\alpha_{C_H} E}{1-\nu} \int_{r_0}^{r_1} C_H r dr + \frac{2\nu EA_1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \pi(r_1^2 - r_0^2). \quad (16)$$

Оскільки результуюче осьове напруження

$$-\int_{r_0}^{r_1} \sigma'_z 2\pi r dr = -\int_{r_0}^{r_1} A 2\pi r dr = -A\pi(r_1^2 - r_0^2), \quad (17)$$

то на основі виразів (16) і (17) одержуємо значення  $A$ , за якого повна осьова сила зведеться до нуля:

$$A = \frac{2\alpha_{C_H} E}{(1-\nu)(r_1^2 - r_0^2)} \int_{r_0}^{r_1} C_H r dr - \frac{2\nu EA_1}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (18)$$

Напруження  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  визначатимемо так само, як і для плоскої деформації, тобто за формулами (12), (13). Проте на переміщення  $u$  впливає осьове напруження  $\sigma'_z = A$ . Тому від правої частини рівності (11) слід відняти член  $\nu Ar/E$ .

Записані формули відтворюють НДС у порожнистому циліндричному зразку, обумовлений концентрацією водню  $C_H$ . Це дає можливість детальніше проаналізувати процеси наводнювання та розводнювання такого циліндра, що може бути аналогом їх моделі у металевій трубі.

**Порожнистий металевий циліндр під час наводнювання.** Розглянемо порожнистий циліндричний зразок в умовах плоскої деформації за постійної концентрації водню  $C_0$  на його поверхнях та нульової початкової. Якщо, починаючи з деякого моменту  $t = 0$ , на поверхнях зразка концентрація водню  $C_0$ , то розподіл її у будь-який момент часу  $t$  можна подати розвиненням [15]

$$C_H = \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\{J_0(r_0\mu_n) - J_0(r_1\mu_n)\} C_0 J_0(r_0\mu_n) \Psi_n(r)}{J_0^2(r_1\mu_n) - J_0^2(r_0\mu_n)} e^{-D\mu_n^2 t} + C_0 \frac{\ln(r_1/r) + \ln(r/r_0)}{\ln(r_1/r_0)}, \quad (19)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії водню;  $\Psi_n(r) = J_0(r\mu_n)Y_0(R_2\mu_n) - J_0(R_2\mu_n)Y_0(r\mu_n)$ , причому  $J_0(z)$  та  $Y_0(z)$  – функції Бесселя першого та другого роду;  $\mu_n$  – додатні корені трансцендентного рівняння

$$J_0(R_1\mu)Y_0(R_2\mu) - J_0(R_2\mu)Y_0(R_1\mu) = 0.$$

Підставляючи ряд (19) у співвідношення (12)–(14), отримаємо компоненти тензора напружень, індуковані воднем у порожнистому циліндрі залежно від часу  $t$  його наводнювання.

**Порожнистий металевий циліндр під час розводнювання.** Розглянемо порожнистий циліндричний зразок в умовах плоскої деформації за початкової концентрації водню  $C_0$ . Нехай у момент  $t = 0$  внутрішня та зовнішня поверхні мають нульову концентрацію. Її розподіл у будь-який наступний момент часу  $t$  можна подати розвиненням [15]

$$C_H = \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 J_0^2(r_0\mu_n) \Psi_n(r)}{J_0^2(r_0\mu_n) - J_0^2(r_1\mu_n)} e^{-D\mu_n^2 t} C_0 \int_{r_0}^{r_1} r \Psi_n(r) dr. \quad (20)$$

Аналогічно, підставляючи (20) у співвідношення (12)–(14), розраховуємо компоненти тензора напружень, індуковані воднем у такому циліндрі, залежно від часу  $t$  його розводнювання.

За наведеним вище алгоритмом встановлюємо компоненти напружень у зразку, індуковані воднем під час наводнювання та розводнювання, які дають можливість точніше оцінити міцність зразка, наприклад, елемента труби у воденьвмісному середовищі. Це особливо важливо для дослідження перехідних режимів роботи конструкції [16], тобто в умовах, коли концентрація розчиненого водню змінюється в часі.

**Числові результати.** Розглянемо конкретні варіанти розрахунку напружень, викликаних воднем у металевому циліндрі. Для моделювання використаємо сталь API X52. Її механічні властивості та параметри, необхідні для аналізу дифузії водню, такі: модуль Юнга  $E = 207 \cdot 10^9$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,3$ ; коефіцієнт дифузії водню  $D = 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с [17]; коефіцієнт концентраційного водневого розширення  $\alpha_{C_H} = 0,69 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/mol [12]. Внутрішній та зовнішній радіуси зразка відповідно 10 та 11 см.

Вивчали рівномірний та лінійний розподіли концентрації водню. Вважали, що у першому випадку концентрація водню у циліндрі  $C_H = 10$  mol/m<sup>3</sup> рівномірна [18], а в другому – лінійно зростає від нульового значення із внутрішньої поверхні до 10 mol/m<sup>3</sup> на зовнішній, тобто задається формулою  $C_H = 10(r - r_0)/(r_1 - r_0)$  mol/m<sup>3</sup>. Підставивши ці значення у співвідношення (12)–(15), отримуємо компоненти напружень у порожнистому циліндрі, викликані відповідним розподілом водню. Їх зміну ілюструє рис. 3а (рівномірна концентрація водню) та рис. 3б (лінійна). Як бачимо, в першому випадку компоненти напружень  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  лінійні та стискальні. Оскільки зразок знаходиться в умовах плоскої деформації, то цього й слід було очікувати. За лінійного розподілу концентрації компоненти напружень теж лінійно змінюються в радіальному напрямку, причому біля внутрішньої поверхні компоненти  $\sigma_\theta$  та  $\sigma_z$  практично нульові, а біля зовнішньої – стискальні, тоді як радіальні напруження  $\sigma_r$  є розтягальні в усьому перерізі зразка.

За формулами (19) та (20) одержали числові результати, що характеризують концентрацію водню під час наводнювання (рис. 4а) та розводнювання (рис. 4с) циліндричного зразка зі сталі API X52. Поверхневу (під час наводнювання) та початкову (за розводнювання) концентрації водню приймали рівними 10 mol/m<sup>3</sup>.

За формулами (19), (12)–(15) та (20), (12)–(15) розраховували компоненти напружень, спричинені воднем у циліндрі під час його наводнювання (рис. 4б) та розводнювання (рис. 4д) впродовж 500 min.

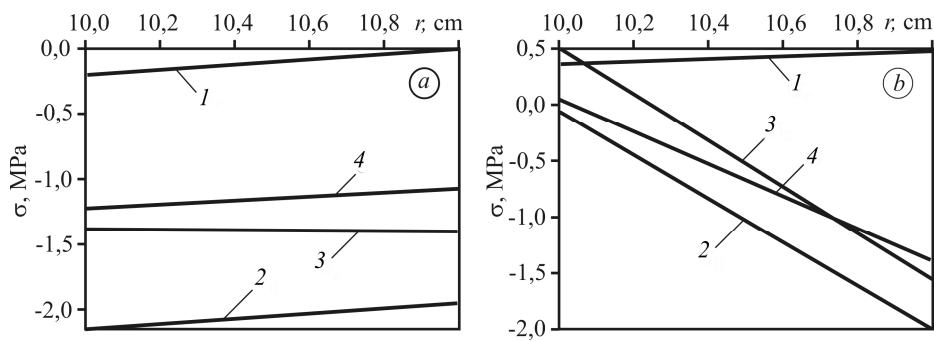


Рис. 3. Напруження за рівномірного  $C_H = 10 \text{ mol/m}^3$  (a) та лінійного  $10(r - r_0)/(r_1 - r_0) \text{ mol/m}^3$  (b) розподілів вмісту водню в порожнистому металевому циліндрі: 1 –  $\sigma_r$ ; 2 –  $\sigma_\theta$ ; 3 –  $\sigma_z$ ; 4 –  $\sigma$ .

Fig. 3. Tension under uniform  $C_H = 10 \text{ mol/m}^3$  (a) and linear  $10(r - r_0)/(r_1 - r_0) \text{ mol/m}^3$  (b) distribution of hydrogen in a metal hollow cylinder: 1 –  $\sigma_r$ ; 2 –  $\sigma_\theta$ ; 3 –  $\sigma_z$ ; 4 –  $\sigma$ .

Отже, під час наводнювання всередині стінки порожнистого циліндричного зразка виникає розтягальна зона, а біля поверхні – інтенсивні стискальні напруження (див. рис. 4b). Під час розводнювання – відповідна стискальна зона, причому біля поверхні циліндра напруження практично нульові (див. рис. 4d).

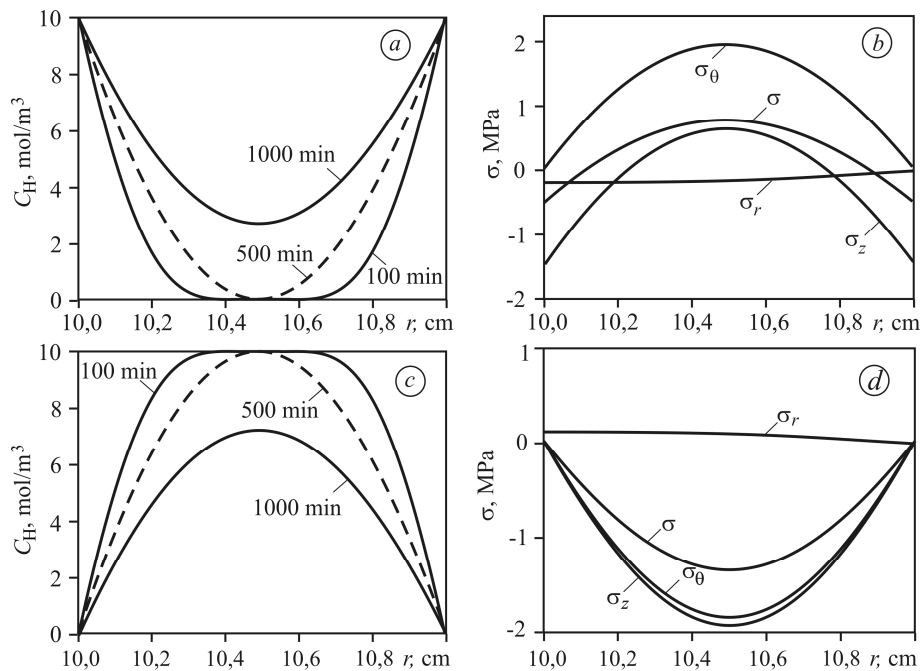


Рис. 4. Розподіл концентрації  $C_H = 10 \text{ mol/m}^3$  (a, c) водню в порожнистому циліндричному зразку під час наводнювання (a) і розводнювання (c) та напруження (b, d), викликані ним під час наводнювання (b) та розводнювання (d) упродовж 500 min.

Fig. 4. Average concentration of hydrogen  $C_H = 10 \text{ mol/m}^3$  (a, c) in a hollow cylindrical sample during hydrogenation (a) and dehydrogenation (c) and stresses (b, d) caused by the hydrogen under hydrogenation (b) and dehydrogenation for 500 min (d).

## ВИСНОВКИ

Запропоновано базові рівняння, за якими можна оцінити додаткові компоненти напруження в матеріалі, обумовлені воднем. Встановлено компоненти цих напружень у порожнистому циліндричному зразку. За наводнювання всередині

стілки порожнистого зразка присутні розтягальні напруження, а біля його поверхонь – стискальні. Під час розводнювання картина протилежна, причому всередині зразка є рівномірна стискальна зона, а біля його поверхонь напруження, спричинені воднем, практично зникають.

*РЕЗЮМЕ.* С позиций теории упругости сформулирована система основных ключевых уравнений для определения компонент напряжений в металле, обусловленных водородом. Основные уравнения записаны для полого цилиндрического тела, а также получены соответствующие расчетные соотношения. Рассчитаны компоненты тензора напряжений, индуцированные водородом в полом цилиндре.

*SUMMARY.* From the point of view of the elasticity theory a system of basic equations for determination of the key components of the hydrogen-induced stresses in the metal is formulated. Basic equations are written for a hollow cylindrical body. The appropriate calculation relations are also obtained. Numerical tensor components of hydrogen-induced stresses in a hollow cylinder are calculated.

1. Goltsov V. A., Glukhova Zh. L., and Redko A. L. Hydrogen elasticity effect and its importance in diffusion of concentration inhomogeneities in metals // Intern. J. Hydrogen Energy. – 1997. – **22**. – P. 179–183.
2. Goltsov V. A., Glukhova Zh. L., and Minakova O. A. Hydrogen elasticity phenomenon: Experimental manifestations and theory // J. Alloys and Compounds. – 2005. – **404–406**. – P. 576–579.
3. 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. Nuclear Hydrogen Production and App. – 2008. – № 4. – P. 334–342.
4. Liang Y., Sofronis P., and Dodds Jr R. H. Interaction of hydrogen with crack-tip plasticity: effects of constraint on void growth // Mat. Sci. and Eng. – 2004. – **366**. – P. 397–411.
5. Sinning H. R. The inter crystalline Gorsky effect // Hid. – 2004. – **370**. – P. 109–113.
6. Vengallatore S. Gorsky damping in nanomechanical structures // Scripta Materialia. – 2005. – **52**. – P. 1265–1268.
7. Сташук М. Г. Взаємовплив напружено-деформованого стану і концентрації водню в системі “метал–водень” // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 4. – С. 71–77.  
(Stashchuk M. H. Mutual influence of the stress-strain state and hydrogen concentration in the metal-hydrogen system // Materials Science. – 2011. – **47**, № 4. – P. 499–508.)
8. Stashchuk M. H. and Dorosh M. I. Evaluation of hydrogen stresses in metal and redistribution of hydrogen around crack-like defects // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2012. – **37**. – P. 14687–14696.
9. Vlasov N. M. and Fedik I. I. Hydrogen segregation in the area of threefold junctions of grain boundaries // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2002. – **27**. – P. 921–926.
10. Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у воденьвмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
11. Numerical analysis on hydrogen diffusion and concentration in solid with emission around the crack tip / A. T. Yokobori, Jr. T. Nemoto, K. Satoh, T. Yamada // Eng. Fract. Mech. – 1996. – **55**. – P. 47–60.
12. Rupp B. On the change in physical properties of  $Ti_{4-x}Fe_{2+x}O_y$  during hydrogenation. 1. Activation behaviour of ternary oxides  $Ti_{4-x}Fe_{2+x}O_y$  and  $\beta$ -Ti // J. of the Less-Commons Metals. – 1984. – **104**. – P. 51–63.
13. Водород в металлах. Прикладные аспекты: Пер. с англ. / Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. – М.: Мир, 1981. – **2**. – 430 с.
14. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
15. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
16. Шаповалов В. И. Легирование водородом. – Днепропетровск: Журфонд, 2013. – 386 с.
17. Farzam M. Hydrogen degradation of steel-diffusion and deterioration // Iranian J. of Sci. & Tech. – 2004. – **28**. – P. 255–263.
18. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh, and G. Pluvinage // Int. J. Hydrogen Energy. – 2008. – **33**. – P. 7630–7641.

Одержано 30.03.2015