

PACS numbers: 62.20.-x, 66.30.jp, 81.05.Bx, 81.40.Lm

Вплив Гідрогену на процес зміни форми пластин з паладію за температури вище критичної

О. М. Любименко

*Донецький національний технічний університет,
пл. Шибанкова, 2
85300 Покровськ, Україна*

В роботі описано та проаналізовано відеозапис експерименту по вивченню зміни форми паладієвої пластини при температурі 350°C. Експеримент виконували для пластини, яка з одного боку покрита мідною плівкою, що не пропускає водень та не впливає на величину формозмінення. Насичення та дегазацію зразка виконували в три етапи. Вже після першого етапу отримували градієнтний стоп паладію з Гідрогеном α -PdH_n, тому на наступному етапі поступово збільшували вміст Гідрогену у стопі PdH_n на $\Delta n = n = 0,00657 = \text{const}$, від 0,00167 до 0,02068 H/Pd. З відеозапису отримано, що вигин пластини в процесі насичення та дегазації для стопу α -PdH_n відбувається в два етапи: перший етап — це досягнення максимального вигину; другий етап — розпрямлення пластини та повернення до початкового стану. Вперше експериментально визначено, що при насиченні стопу α -PdH_n, при збільшенні вмісту Гідрогену на $\Delta n = n = 0,00657$ H/Pd в паладії величина максимального вигину пластини зменшувалася, проте вигини пластини завжди були майже повністю оборотними. При протіканні процесу дегазації при зміні вмісту Гідрогену на Δn максимальні вигини відбувалися у протилежний бік, та мали незначне зростання і були також

Corresponding author: Olena Mykolayivna Lyubymenko
E-mail: e.n.lyubymenko@gmail.com

*Donetsk National Technical University
2 Shybankov Sqr., UA-85300 Pokrovs'k, Ukraine*

Citation: O. M. Lyubymenko, The Influence of Hydrogen on the Process of Changing the Shape of Palladium Plates at a Temperature above at the Critical Temperature, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 2: 263–274 (2023).
DOI: 10.15407/mfint.45.02.0263

майже повністю оборотними. Процес формування максимального вигину пластини для градієнтних стопів $\alpha\text{-PdH}_{0.00657}$, $\alpha\text{-PdH}_{0.0132}$, $\alpha\text{-PdH}_{0.02068}$ обумовлений дифузійним транспортом Гідрогену, перерозподілом внутрішніх напружень у пластині при її вигині (розпрямленні) та відповідною перебудовою концентраційного поля Гідрогену, що змінює внутрішні умови дифузійного транспорту Гідрогену в шари стопу $\alpha\text{-PdH}_n$, які мають інші фізичні властивості (період ґратниці, модуль Юнга), ніж чистий паладій.

Ключові слова: водень, паладій, дифузія, градієнтний стоп, насичення, дегазація, концентрація, водневі напруження.

The paper describes and analyses a video recording of an experiment to study the change in shape of a palladium plate at a temperature of 350°C. The experiment was performed for a plate covered on one side with a copper film that does not allow hydrogen to pass through and does not affect the amount of deformation. Sample saturation and degassing was performed in three stages. Already after the first stage, a gradient alloy of palladium with hydrogen $\alpha\text{-PdH}_n$ was obtained, therefore, at the next stage, the hydrogen content in the PdH_n alloy was gradually increased by $\Delta n = n = 0.00657 = \text{const}$, from 0.00167 to 0.02068 N/Pd. From the video recording, it was found that the bending of the plate in the process of saturation and degassing for the $\alpha\text{-PdH}_n$ alloy occurs in two stages: the first stage is the achievement of the maximum bending; the second stage is straightening the plate and returning to the initial state. It was experimentally determined for the first time that upon saturation of the $\alpha\text{-PdH}_n$ alloy, when the hydrogen content increased by $\Delta n = n = 0.00657$ N/Pd in palladium, the value of the maximum bending of the plate decreased, but the bending of the plate was always almost completely reversible. During the course of the degassing process, when the hydrogen content changed by Δn , the maximum bends occurred in the opposite direction, but had a slight increase and were also almost completely reversible. The process of forming the maximum bending of the plate for the gradient alloys $\alpha\text{-PdH}_{0.00657}$, $\alpha\text{-PdH}_{0.0132}$, $\alpha\text{-PdH}_{0.02068}$ is due to the diffusion transport of hydrogen, the redistribution of internal stresses in the plate during its bending (straightening) and the corresponding rearrangement of the concentration field of hydrogen, which changes the internal conditions of diffusion transport of hydrogen into the layers of the $\alpha\text{-PdH}_n$ alloy, which have different physical properties (lattice period, Young's modulus) than pure palladium.

Key words: hydrogen, palladium, diffusion, gradient alloy, saturation, degassing, concentration, hydrogen stresses.

Отримано 16 січня 2023 р.; остаточн. варіант — 23 лютого 2023 р.

1. ВСТУП

Проникнення Гідрогену в метал вже протягом століття викликає

цікавість у металознавців та дискусії з приводу позитивного, а саме підвищення пластичних характеристик [1], або негативного впливу Гідрогену на метал, яке викликає деформацію, жолоблення, водневу крихкість [1, 2]. Класичним матеріалом для вивчення фундаментальних основ проникнення Гідрогену в метал є паладій [3–6]. Спочатку молекулярний водень підходить до поверхні паладію, де відбувається розділення молекул Гідрогену на атоми та при подоланні енергетичного бар'єру водень потрапляє в середину паладію, викликає розширення та видовження металу. Так при кімнатній температурі збільшення вмісту Гідрогену в паладії у α -області діаграми Pd–H до $n = 0,008$ H/Pd призводить до того, що кристалічна ГЦК ґратниця паладію плавно розширюється, а значення постійної ґратниці зростає з $a = 3,890$ Å ($n = 0,0$ H/Pd) до $a = 3,894$ Å [7]. Далі відбувається процес дифузії та атоми Гідрогену перерозподіляються по об'єму паладію, в результаті чого атомарна концентрація Гідрогену стає рівною рівноважній концентрації, яка залежить від температури, тиску молекулярного Гідрогену і змінюється по закону Сивертса (Siverts) [3, 8–9].

Мета дослідження: провести експериментальне дослідження по зміні форми для зразка в формі пластини в результаті насичення та дегазації пластини Гідрогеном при температурі 350°C.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для проведення експериментів використовували модернізовану воднево-вакуумну установку ВВУ-4 [10]. Насичення Гідрогеном проводили для зразків у формі пластини (68×5,5×0,27 мм) з чистого паладію 99,98%, використовуючи систему Pd–H при температурах вище критичної точки ($P_{кр} = 1,97 \pm 0,02$ МПа, $T_{кр} = 292 \pm 2$ °C, $n_{кр} = 0,250 \pm 0,005$ H/Pd), де утворюється однофазний твердий розчин впровадження Гідрогену в паладій [7].

Всі експерименти проводили при температурі 350°C та зміні робочих тисків в камері від 0,03 МПа до 0,27 МПа з кроком 0,03, 0,09, 0,15 МПа.

Пластину з чистого паладію перед дослідом покривали з одного боку міддю електролітичним способом. Далі цю металеву пластину закріплювали в тримач, мідною стороною догори, а за іншим кінцем зразка через вікно робочої камери проводили спостереження та вели відеозапис процесу. Після встановлення зразка в камеру проводили при температурі експерименту (350°C) вакуумний відпал (повільні нагріви зі швидкістю 3°C/хв. і наступні охолодження разом з електропіччю). Після зняття залишкових напружень до камери зі зразком подавали водень до заданих ти-

сків та проводили експеримент. Методика дослідження полягала в отриманні даних по реєстрації зміни форми зразку щосекундно при подачі Гідрогену в камеру та дослідженні поведінки зразка при подальшому насиченні та наступній витримці в середовищі Гідрогену.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Було проведено експерименти при температурі 350°C (рис. 1). Зразок з чистого паладію встановили в робочу камеру, а далі в робочій камері піднімали тиск три рази ($\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа): від 0 МПа до 0,03 МПа та отримали стоп $\alpha\text{-PdH}_{0,00657}$, від 0,03 МПа до 0,12 МПа та отримали стоп $\alpha\text{-PdH}_{0,0132}$, від 0,12 МПа до 0,27 МПа та отримали стоп складом $\alpha\text{-PdH}_{0,02068}$.

На рисунку 1 представлено експериментальні спостереження зміни вигину пластини протягом часу насичення. Перший раз подавали дифузійно-очищений водень в робочу камеру до 0,03 МПа ($\Delta P_{H_2} = 0,03$ МПа) зі швидкістю 0,0058 МПа/с протягом 5,1 с до 0,03 МПа та спостерігали за величиною вигину пластини. Максимальний вигин пластини від положення рівноваги після початку напуску Гідрогену склав +1,05 мм через 10 с, а при подальшій витримці в Гідрогені, зразок почав поступово розпрямлятися і через 960 с досяг рівноважного стану — відхилення від

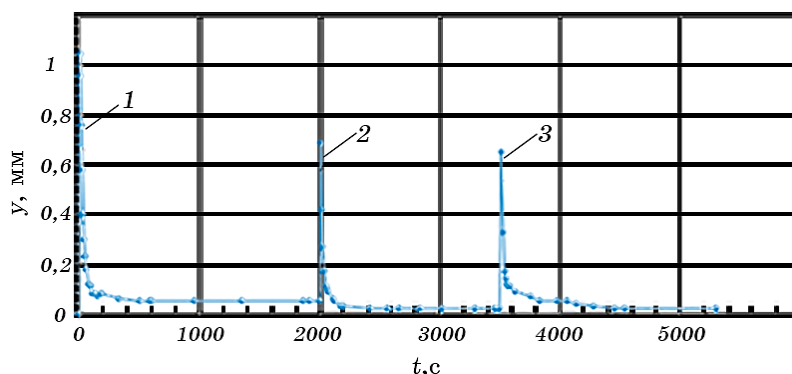


Рис. 1. Залежність стріли вигину пластини при 350°C при її односторонньому насиченні гідрогеном при зміні концентрації на $\Delta n = 0,00657$ Н/Pd: 1) чистого паладію, 2) стопу $\alpha\text{-PdH}_{0,00657}$, 3) стопу $\alpha\text{-PdH}_{0,0132}$.

Fig. 1. Dependence of the bending radius of the plate at 350°C during its one-sided saturation with hydrogen when the concentration changes by $\Delta n = 0.00657$ H/Pd: 1) pure palladium, 2) alloy $\alpha\text{-PdH}_{0.00657}$, 3) alloy $\alpha\text{-PdH}_{0.0132}$.

початкового стану склало +0,03 мм, яке зберігалася не змінним при додатковій витримці протягом 1380 с. В другий раз здійснювали напуск в робочу камеру дифузійно очищеного Гідрогену до 0,12 МПа ($\Delta P_{H_2} = 0,09$ МПа) протягом 3,96 с зі швидкістю 0,0227 МПа/с. Максимальний вигин пластини досяг +0,69 мм через 10 с після напуску, та при подальшій витримці і насиченні Гідрогеном зразок почав поступово розпрямлятися і через 505 с досяг рівноважного стану – відхилення від початкового стану склало +0,02 мм та зберігалася при додатковій витримці в Гідрогені протягом 1020 с.

В третій раз здійснювали напуск в робочу камеру дифузійно-очищеного Гідрогену до 0,27 МПа ($\Delta P_{H_2} = 0,15$ МПа) протягом 5,76 с зі швидкістю 0,026 МПа/с. Максимальний вигин пластини досяг +0,65 мм через 11 с після напуску. Та при наступній витримці в Гідрогені пластини також поступово розпрямлялася та через 1020 с досягла рівноважного стану – відхилення склало +0,02 мм, яке зберігалася при додатковій витримці 900 с.

Далі проведені експерименти повторили але в зворотному порядку (рис. 2), а саме: провели три рази дегазацію зразка, змінювали тиск ($\Delta P_{H_2} = 0,15, 0,09, 0,03$ МПа):

від 0,27 МПа до 0,12 МПа й отримували стоп $\alpha\text{-PdH}_{0,02068}$;

від 0,12 МПа до 0,03 МПа та отримували стоп $\alpha\text{-PdH}_{0,0132}$;

від 0,03 МПа до 0 МПа та отримали стоп $\alpha\text{-PdH}_{0,00657}$.

В перший раз проводили дегазацію зразка в камері від 0,27 МПа до 0,12 МПа ($\Delta P_{H_2} = 0,15$ МПа) протягом 7,20 с зі шви-

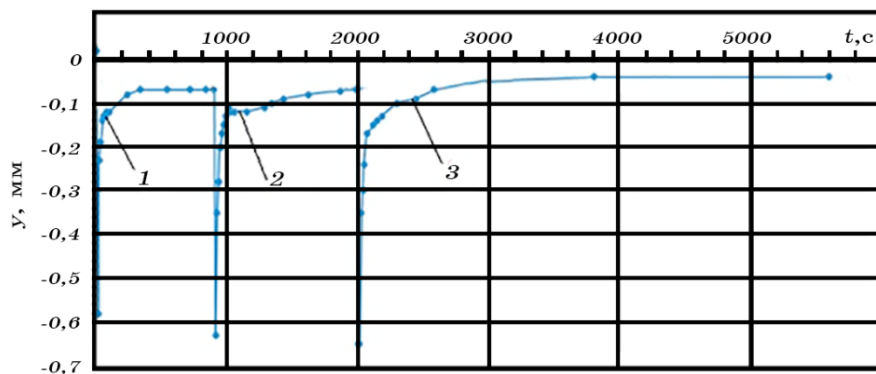


Рис. 2. Залежність стріли вигину пластини при 350 °С при її односторонній дегазації при зміні концентрації на $\Delta n = 0,00657$ H/Pd: 1) стопу $\alpha\text{-PdH}_{0,02068}$, 2) стопу $\alpha\text{-PdH}_{0,0132}$, 3) стопу $\alpha\text{-PdH}_{0,00657}$.

Fig. 2. Dependence of the bending radius of the plate at 350 °C during its one-sided degassing when the concentration changes by $\Delta n = 0.00657$ H/Pd: 1) alloy $\alpha\text{-PdH}_{0.02068}$, 2) alloy $\alpha\text{-PdH}_{0.0132}$, 3) alloy $\alpha\text{-PdH}_{0.00657}$.

дкістю 0,0139 МПа/с для стопу α -PdH_{0,02068}. Максимальний вигин пластини (-0,58 мм) спостерігали після початку процесу дегазації через 18 с у зворотний бік від положення рівноваги. Наступна витримка пластини вже зі стопу α -PdH_{0,0132} у водневому середовищі призвела до поступового зменшення величини вигину паладієвої пластинки майже до вихідного положення. Залишковий вигин пластини склав (-0,07 мм), тобто майже 4% від вихідного максимального вигину та був зафіксований внаслідок витримки протягом 395 с в водневому середовищі. Додаткова витримка пластини в такому водневому середовищі протягом 450 с не призвела до зменшення залишкового вигину зразка до нуля.

Далі камера дегазувалася від 0,12 МПа до 0,03 МПа ($\Delta P_{H_2} = 0,09$ МПа) протягом 11,70 с зі швидкістю 0,0076 МПа/с. Максимальний вигин пластини (-0,63 мм) від положення рівноваги спостерігали через 11 с після початку другої дегазації та отримали стоп α -PdH_{0,00657}. Наступна витримка протягом 720 с у середовищі Гідрогену, призвела до поступового зменшення негативного вигину паладієвої пластинки до (-0,07 мм). Додаткова витримка пластини протягом 1020 с не призвела до суттєвих змін положення пластини і камеру дегазували в третій раз.

В третій раз зразок в камері дегазували від 0,03 МПа до 1,33 Па ($\Delta P_{H_2} = 0,03$ МПа) протягом 6 с зі швидкістю 0,0056 МПа/с, максимальний вигин (-0,65 мм) спостерігали через 6 с після початку дегазації. Витримка у вакуумі, що викликає дегазацію зразка, призвела через 900 с до поступового зменшення вигину паладієвої пластинки (-0,05 мм), який протягом додаткової витримки протягом 2100 с у вакуумі не призвів до зменшення залишкового вигину пластини до нуля. Але це дозволило провести дегазацію паладію, очистити пластину від Гідрогену і отримати знов пластину чистого паладію, а не стопу α -PdH_n.

Проведемо аналіз отриманих експериментальних даних при насиченні зразка зі стопу α -PdH_n при зміні тиску Гідрогену на ($\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа) (рис. 3) за даними отриманими для зразків при насиченні чистого паладію при зміні тиску Гідрогену на ($\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа), для яких максимальний вигин складає 1,03 мм, 1,51 мм, 1,66 мм (рис. 3, крива 3).

Цікавим є той факт, що для стопу α -PdH_n (рис. 3, крива 4) зі зростанням тиску Гідрогену на $\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа, спостерігається зменшення максимального вигину (y_{max}) пластини, але при цьому вигини є повністю зворотними (рис. 1). Також в кожному експерименті спостерігається стабільне плато, де утримується максимальний вигин.

Виникнення максимального вигину пластини, відповідає максимальному рівню виникнення пружних внутрішніх градієнтних напружень в пластині. Схема розташування та геометричні па-

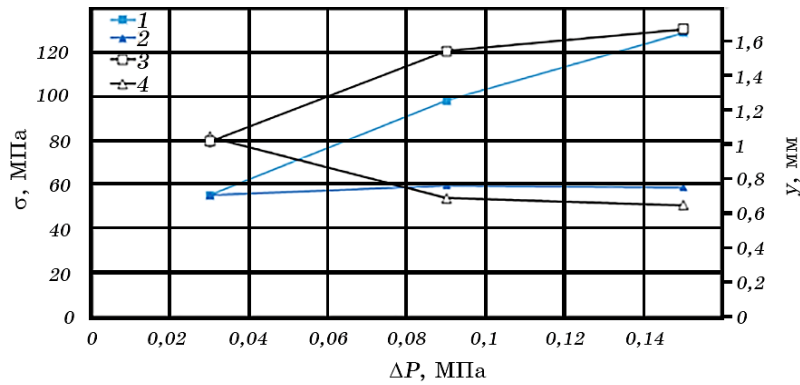


Рис. 3. Залежності зміни величини максимального вигину пластини (3, 4) в процесі насичення та величини воднево-пружних напружень в пластині (1, 2) при зміні тиску на $\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа: 1, 3 — для чистого паладію; 2, 4 — для паладію зі стопу α -PdH_n.

Fig. 3. Dependences of the change in the value of the maximum bending of the plate (3, 4) in the process of saturation and the value of the hydrogen-elastic stresses in the plate (1, 2) when the pressure changes by $\Delta P_{H_2} = 0.03, 0.09, 0.15$ MPa: 1, 3—for pure palladium; 2, 4—for palladium from the α -PdH_n alloy.

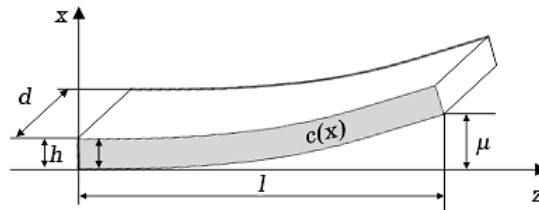


Рис. 4. Схема вигину пластини з паладію, де d — ширина пластини; l — довжина пластини; h — товщина пластини; $c(x)$ — концентрація; μ — відхилення пластини.

Fig. 4. Scheme of bending of a palladium plate, where d is the width of the plate; l —plate length; h —plate thickness; $c(x)$ —concentration; μ —deviation of the plate.

раметри паладієвої пластини, яка згинається наведено на рис. 4.

Розрахунок воднево-пружної напруги проведемо для випадку, коли концентрація Гідрогену залежить від координати (x) поперек пластини $c = c(x)$, яка є однорідною вздовж пластини (z) і вздовж бічної координати (y) [11, 12].

При цьому пропорційними один одному будуть не концентрації $c(x)$ та пружні деформації $\varepsilon(x)$, а їх градієнти відповідно:

$$\frac{dc(x)}{dx} \text{ та } \frac{d\varepsilon(x)}{dx}.$$

Тому пропорційність між концентрацією та пружними деформаціями справедлива лише з точністю до адитивної константи:

$$\varepsilon(x) = -\alpha[c(x) - c_m], \quad (1)$$

де α — константа (0,068), $c(x)$ — рівноважна концентрація для кожного експерименту при заданих значеннях тиску та температури, c_m — середня за зразком концентрація Гідрогену:

$$c_m = \frac{1}{h} \int_0^h c(x) dx. \quad (2)$$

Воднево-пружні напруження пропорційні пружним деформаціям:

$$\sigma(x) = -\alpha E[c(x) - c_m], \quad (3)$$

де E — модуль Юнга паладію ($E = 1,23 \cdot 10^5$ МПа).

З формули (3) видно, що при насиченні чистого паладію при зміні тиску на $\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа (та при зміні концентрації на $\Delta n = 0,00657$ Н/Pd, $0,012$ Н/Pd, $0,015$ Н/Pd відповідно) рівень воднево-пружних напружень в пластині паладію зростає до 55, 98, 129 МПа (рис. 3, крива 1), тобто майже в 2,35 рази.

Для пластини зі стопу α -PdH_n при зміні тиску на $\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа, та зі зростанням концентрації Гідрогену в паладії на $\Delta n = 0,00657$ Н/Pd при 350°C маємо наступні значення пружних напружень в паладії $\sigma(x)$: 58,6, 59,4, 55 МПа (рис. 3, крива 2).

Отримані значення пружних напружень в паладії $\sigma(x)$ в усіх експериментах нижче межі текучості 200 МПа. Іншими словами, водневі пружні напруження в наших експериментах знаходяться в пружному діапазоні.

Проаналізувавши криві 1 та 2 на рис. 3, та виявивши досить велику різницю у величині максимального вигину пластини можемо зробити висновок, що за величину максимального вигину відповідає величина внутрішніх пружних напружень, які виникають в пластині при насиченні Гідрогеном. І саме це пояснює таку різницю в величині максимального вигину для пластини з чистого паладію в порівнянні з пластиною насиченою Гідрогеном до стопу α -PdH_n.

Цікаво провести оцінку впливу Гідрогену на вигин пластини при дегазації пластини при зміні тиску на $\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа для чистої пластини (рис. 5, крива 3) та стопу α -PdH_n (рис.

5, крива 4).

З рисунка 5 бачимо, що для стопу $\alpha\text{-PdH}_n$ в процесі дегазації та при зміні тиску Гідрогену на $\Delta P_{\text{H}_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа відбувається збільшення максимального вигину (y_{max}) пластини (крива 4) і вигини є повністю зворотними, тобто пластина повертається в початковий стан. При цьому зміна напруження відбувається відповідно на 58,6, 59,4, 55 МПа. За даними отриманими для зразків при дегазації чистого паладію (крива 3) при зміні тиску Гідрогену на ($\Delta P_{\text{H}_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа) максимальний вигин зростає і складає $-0,68$ мм, $-1,02$ мм, $-1,37$ мм (рис. 3, крива 3).

На нашу думку, пояснити таку поведінку пластини зі стопу $\alpha\text{-PdH}_n$ при насиченні та дегазації можливо тим, що під час формування стопу $\alpha\text{-PdH}_n$ в пластині виникають водневі концентраційні напруження, які компенсуються та перерозподіляються при поверненні пластини в початковий стан. Утворення тимчасового ґрадієнтного стопу $\alpha\text{-PdH}_n$ можна умовно представити як пластину, в якій в процесі насичення відбувається формування шарів паладію з різною концентрацією ($c_1, c_2, \dots, c_{N-1}, c_N$) та товщиною шарів при зміні довжини від $l(0)$ до $l(h)$. Тому, коли во-

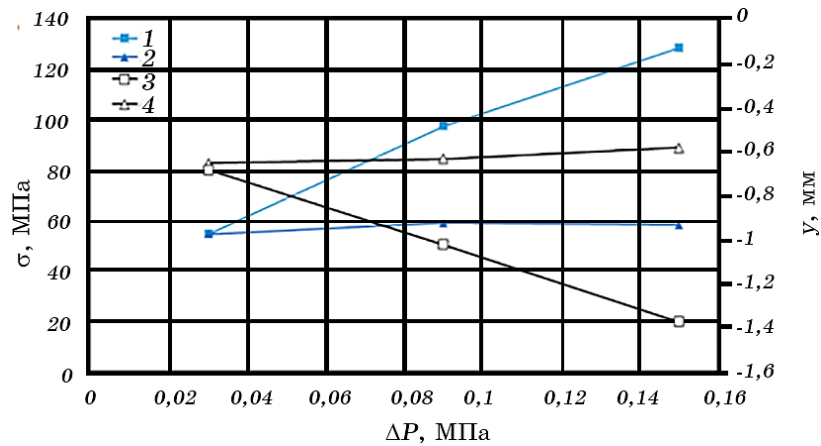


Рис. 5. Залежності зміни величини максимального вигину пластини (3, 4) в процесі дегазації та величини воднево-пружних напружень в пластині (1, 2) при зміні тиску на $\Delta P_{\text{H}_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа: 1, 3 — для чистого паладію; 2, 4 — для паладію зі сплаву $\alpha\text{-PdH}_n$.

Fig. 5. Dependences of the change in the value of the maximum bending of the plate (3, 4) in the degassing process and the value of the hydrogen-elastic stresses in the plate (1, 2) when the pressure changes by $\Delta P_{\text{H}_2} = 0.03, 0.09, 0.15$ MPa: 1, 3—for pure palladium; 2, 4—for palladium from the $\alpha\text{-PdH}_n$ alloy.

день із зовнішнього локалізованого шару починає проникати у глибинні шари пластини, градієнт дилатації кристалічної ґратниці зменшується і пластина починає опиратися вигинанню, тим самим намагаючись розпрямлятися. Проте в області з'єднання шарів відносно видовження шарів має однакову величину. Тому існування в пластині шарів з різною величиною періоду кристалічної ґратниці є аналогією з біметалевими пластинами, робота яких заснована на неоднаковій дилатації кристалічних ґратниць шарів, які мають різні коефіцієнти температурного розширення [13].

Тому при заданому тиску (P_{H_2}) і температурі (T) товщина шару (h_1) стопу α -PdH_n в момент досягнення y_{\max} визначається часом досягнення максимального вигину, вмістом Гідрогену в паладії, коефіцієнтом дифузії Гідрогену в паладії, який при постійній температурі 350°C залишається постійним, та залежить від подовження (Δl) шару градієнтного стопу α -PdH_n.

Як бачимо з рисунку 3, крива 4, з ростом тиску Гідрогену зменшується максимальний вигин пластини, який регламентується не тільки властивостями системи Pd-H (D_{H_2} , n_0), але і складним взаємним впливом трьох взаємопов'язаних кінетичних процесів, який носить синергетичний характер:

- 1) дифузійний транспорт Гідрогену, швидкість якого залежить від швидкості подачі газоподібного Гідрогену, що породжує поле некомпенсованих внутрішніх напружень у пластині;
- 2) перерозподіл внутрішніх напружень у пластині з ростом концентрації Гідрогену у пластині;
- 3) відповідна перебудова концентраційного поля Гідрогену у пластині, що змінює внутрішні умови дифузійного транспорту Гідрогену.

Робота цієї тріади кінетичних процесів, а саме їх взаємодія, визначає особливості кінетики і масштаби величини вигину пластини та розпрямлення пластини, і, в свою чергу, залежить від умов проведення експерименту (швидкості подачі Гідрогену, концентрації, тиску та температури).

Проведені дослідження відкривають можливості розробки швидкодіючого водневого сенсора, що працює в широкому інтервалі температур та в області низьких концентрацій Гідрогену, принцип дії якого заснований на явищі формозмінення пластини.

4. ВИСНОВКИ

1. Вперше на основі відеозапису проведено дослідження та аналіз закономірностей вигину пластини з паладію при температурі 350°C при односторонньому насиченні Гідрогеном, для чистого

паладію та тимчасових градієнтних стопів α -PdH_{0,00657}, α -PdH_{0,0132}, α -PdH_{0,02068}. Вперше встановлено, що при зміні тиску на $\Delta P_{H_2} = 0,03, 0,09, 0,15$ МПа величина максимальних вигинів:

– для пластини зі стопів α -PdH_n зменшується, а вигини є повністю оборотними, попри те що зміна концентрації Гідрогену в паладії $\Delta n = 0,00657$ Н/Pd залишається постійною; значення пружних напружень в паладії складають $\sigma(x)$: 58,6, 59,4, 55 МПа;

– для чистого паладію величина максимального вигину зростає при зміні концентрації на $\Delta n = 0,00657$ Н/Pd, 0,012 Н/Pd, 0,015 Н/Pd відповідно, а рівень воднево-пружних напружень в пластині паладію зростає до 55, 98, 129 МПа.

2. Проведено при температурі 350°C дослідження та аналіз закономірностей вигину пластини зі стопів паладію з воднем при її дегазації. Вперше встановлено, що при зміні тиску на $\Delta P_{H_2} = 0,15, 0,09, 0,03$ МПа величина максимальних вигинів:

– при зміні концентрації на $\Delta n = 0,00657 = \text{const}$ для пластини зі стопів α -PdH_{0,02068}, α -PdH_{0,0132} та α -PdH_{0,00657} зростає, але на незначну величину;

– при зміні концентрації на $\Delta n = 0,00657$ Н/Pd, 0,012 Н/Pd, 0,015 Н/Pd для пластини зі стопів α -PdH_{0,00657}, α -PdH_{0,012}, α -PdH_{0,015} зростає більше ніж у 2 рази (–0,68 мм, –1,02 мм, –1,37 мм).

3. При насиченні, дегазації пластини при 350°C процес формозмінення складається з етапу утворення максимального вигину, утворення плато та подальшого більш тривалого етапу, коли пластини розпрямляється.

4. Процес формування максимального вигину пластини для градієнтних стопів α -PdH_{0,00657}, α -PdH_{0,0132}, α -PdH_{0,02068} обумовлений дифузійним транспортом Гідрогену, перерозподілом внутрішніх напружень у пластині при її вигині (розпрямленні) та відповідною перебудовою концентраційного поля Гідрогену, що змінює внутрішні умови дифузійного транспорту Гідрогену в шари стопу α -PdH_n, які мають інші фізичні властивості (період гратниці, модуль Юнга) ніж чистий паладій.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Progress in Hydrogen Treatment of Materials* (Eds. V. A. Goltsov), (Donetsk: Kassiopeya Ltd.: 2001).
2. X. Du, X. Ye, C. Chen, and C. Jiang, *Int. J. Hydrogen Energy*, **46**, Iss. 1: 1023 (2021).
3. F. A. Lewis, *The Palladium-Hydrogen System* (New York: Academic Press: 1967).
4. Z. Han, K. Xu, N. Liao, and W. Xue, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, **46**, Iss. 46: 23715 (2021).

5. Z. Andreas, *Mater. Today*, **6**, Iss. 9: 24 (2003).
6. A. Lulianelli, K. Ghasemzadeh, M. Marelli, and C. Evangelisti, *Fuel Processing Technology*, **195**: 10641 (2019).
7. Э. Вике, X. Бродовский, *Водород в металлах* (Ред. Г. Алефельд, И. Фёлькль) (Москва: Мир: 1981), т. 2, с. 91 (пер. з англ.).
8. F. A. Lewis, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, **20**, Iss. 7: 587 (1995).
9. G. Alefeld and J. Völkl, *Hydrogen in Metals* (Berlin: Springer Verlag: 1978), p. 321.
10. В. А. Гольцов, Е. Н. Любименко, Ж. Л. Глухова, *Физико-химическая механика материалов*, **45**: 670 (2009).
11. E. P. Feldman, E. N. Lyubimenko, and K. V. Gumennyk, *J. Appl. Phys.*, **127**, Iss. 24: 245104 (2020).
12. E. P. Feldman and E. N. Lyubimenko, *J. Acta Mech.*, **234**: 1619 (2023).
13. O. M. Lyubymenko and O. A. Shtepa, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 12: 1639 (2021).

REFERENCES

1. *Progress in Hydrogen Treatment of Materials* (Eds. V. A. Goltsov) (Donetsk: Kassiopeya Ltd.: 2001).
2. X. Du, X. Ye, C. Chen, and C. Jiang, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, **46**, Iss. 1: 1023 (2021).
3. F. A. Lewis, *The Palladium–Hydrogen System* (New York: Academic Press: 1967), p.178.
4. Z. Han, K. Xu, N. Liao, and W. Xue, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, **46**, Iss. 46: 23715 (2021).
5. Z. Andreas, *Materials Today*, **6**, Iss. 9: 24 (2003).
6. A. Lulianelli, K. Ghasemzadeh, M. Marelli, and C. Evangelisti, *Fuel Processing Technology*, **195**: 10641 (2019).
7. E. Wicke and H. Brodowsky, *Vodorod v Metallakh* [Hydrogen in Metals] (Eds. G. Alefeld and J. Völkl) (Moskva: Mir: 1981), vol. 2, p. 91 (Russian translation).
8. F.A. Lewis, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, **20**, Iss. 7: 587 (1995).
9. G. Alefeld and J. Völkl, *Hydrogen in Metals* (Berlin: Springer Verlag: 1978), p. 321.
10. V. A. Gol'tsov, Ye. N. Lyubimenko, and Zh. L. Glukhova, *Physicochemical Mechanics of Materials*, **45**: 670 (2009).
11. E. P. Feldman, E. N. Lyubimenko, and K. V. Gumennyk, *J. of Appl. Phys.*, **127**, Iss. 24: 245104 (2020).
12. E. P. Feldman and E. N. Lyubimenko, *J. Acta Mech.*, **234**: 1619 (2023).
13. O. M. Lyubymenko and O. A. Shtepa, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 12: 1639 (2021).