

## CRYSTAL-LATTICE DEFECTS

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

### Особливості утворення градієнтного стопу паладію з воднем

О. М. Любименко, О. А. Штепа

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

У роботі проведено дослідження та аналіз відеозапису експерименту з вимірювання стріли вигину консольно закріпленої пластини з паладію, з однієї сторони електролітично покритої міддю. Експерименти проводилися у воднево-вакуумній установці за температури 280°C, за зміни тиску в робочій камері установки та підвищення концентрації водню в паладії на  $\Delta p = 0,0053 = \text{const}$ . Експериментально зафіксовано, що вигин паладієвої пластини у випадку додаткового насичення воднем за 280°C складається з етапу досягнення максимального вигину, який утримується декілька секунд, а потім розпочинається перебіг наступного тривалішого етапу розпрямлення пластини з досягненням майже початкового її стану. Вперше експериментально показано, що за 280°C максимальні вигини пластини з ростом концентрації водню в паладії на однакову величину кожного наступного напуску зменшуються, кінетика перебігу процесу розпрямлення однакова та вигини пластини є оборотними. Обговорено фізичні причини і зроблено припущення, що особлива фізична природа формування в перші секунди максимального вигину пластини обумовлена формуванням тимчасового градієнтного стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  з певною товщиною, який має інші значення модуля Юнга, відмінні від чистого паладію. Вперше встановлено, що за  $T = 280^\circ\text{C}$  товщина шару без водню у паладієвій пластині під час формування градієнтного стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  залежить від вмісту водню в паладії та зменшення величини цієї товщини відбувається саме в області ідеальних та псевдоідеальних твердих розчинів водню в паладії.

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

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

Citation: O. M. Lyubymenko and O. A. Shtepa, Features of the Gradient Palladium-Hydrogen Alloy Formation, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 12: 1639–1651 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.12.1639](https://doi.org/10.15407/mfint.43.12.1639).

**Ключові слова:** водень, паладій, градієнтний стоп  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub>, вигин, концентрація, дифузія.

Research and analysis of the video recording of the experiment on measuring the bending arrow of a cantilever fixed palladium plate, coated with copper on one side by the electrolytic method are carried out. The experiments are carried out in a hydrogen-vacuum plant at a temperature of 280°C, a change in pressure in the working chamber of the plant, and an increase in the hydrogen concentration in palladium by  $\Delta n = 0.0053 = \text{const}$ . It is experimentally recorded that the bending of a palladium plate upon additional saturation with hydrogen at 280°C consists of two stages. First, the maximum bend is reached, which takes a few seconds. At the next, more prolonged stage, the plate is straightened with an almost initial state of the plate. It is experimentally shown for the first time that at 280°C the maximum plate bends decrease with an increase in the hydrogen concentration in palladium by the same amount at each puffing. The kinetics of the straightening process is the same and the plate bends are reversible. The physical reasons are discussed and an assumption is made that the special physical nature of the formation in the first seconds of the maximum bending of the plate is due to the formation of a temporary gradient  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> alloy with a certain thickness, which has other values of Young's modulus, different from pure palladium. It is established for the first time that at  $T = 280^\circ\text{C}$  the thickness of the hydrogen-free layer in a palladium plate during the formation of a gradient  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> alloy depends on the hydrogen content in palladium and a decrease in this thickness occurs precisely in the region of ideal and pseudoideal solid solutions of hydrogen in palladium.

**Key words:** hydrogen, palladium,  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> gradient alloy, bending, concentration, diffusion.

*(Отримано 16 лютого 2021 р.; остаточн. варіант — 15 вересня 2021 р.)*

## 1. ВСТУП

Ефекти, які виникають у разі водневої, термічної обробки металів складають важливу проблему фізики металів та матеріалознавства [1, 2]. Виникнення та релаксація внутрішніх напружень у металевих виробках у разі взаємодії з воднем впливає на властивості матеріалів, які вивчає одна з галузей матеріалознавства «воднева обробка матеріалів». За допомогою водневого впливу можна покращувати структуру та властивості матеріалів, створювати нові матеріали з різноманітними фізичними властивостями [3, 4]. У випадку взаємодії матеріалів з воднем у матеріалах виникають напруження, які індуквані воднем: воднево-фазові та воднево-концентраційні. Ці напруження викликають зміну фізичних властивостей матеріалу, мікро- та наноструктури, зміну форми металевих виробів [5].

Мета даної роботи — експериментальне вивчення поведінки пластини паладію, яка початково не містить водню, насичена воднем

до складу стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$ , де  $n$  — концентрація водню в паладії. Експерименти проводили в умовах зміни концентрації водню  $n$  на  $\Delta n = 0,0053 = \text{const}$ , коли додатково напускали водень до камери. Проведення цих експериментів дозволяє отримати додаткову інформацію про поведінку металу в умовах попередньо насиченого стану стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  воднем у системах метал–водень за підвищених температур та тисків.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

Для вирішення поставленого наукового завдання використано воднево-вакуумну установку ВВУ-4 [6], яка дозволила виконати дослідження з насичення зразків в інтервалі температур від 110 до 360°C в інтервалі робочих тисків у камері від 0,01 до 0,9 МПа.

Металевий зразок у формі тонкої пластини (68×5,5×0,27 мм) з паладію чистотою 99,98% попередньо з одного боку електролітично покрили міддю (металом, що не пропускає водень). Потім зразок закріплювали одним кінцем у тримачі таким чином, щоб вгорі була розташована сторона зразка з мідним покриттям. Інший кінець зразка залишали вільним. Крізь кварцове вікно у робочій камері спостерігали за допомогою відеокамери за поведінкою вільного кінця пластини у разі водневого впливу з одночасним вимірюванням та відеозаписом величини вигину пластини через катетометр.

Одержані відеозаписи розшифровуються щосекунди у програмі Sony Vegas. Під час аналізу відеозапису точність за часом становила 0,04 секунди, а точність вимірювання стріли вигину  $\pm 0,3$  мм. Завдяки такій постановці експерименту нам вдавалось зафіксувати і детально проаналізувати всі етапи формозміни паладієвої пластини у разі водневого впливу в широкому інтервалі температур (110–350°C).

Після встановлення зразка у робочу камеру його піддавали низькотемпературному вакуумному відпалу за температури експерименту 280°C (повільне нагрівання зі швидкістю 3°C/хв і наступне охолодження разом з електропіччю для зняття залишкових напружень). Потім у робочу камеру подавали водень до заданих тисків.

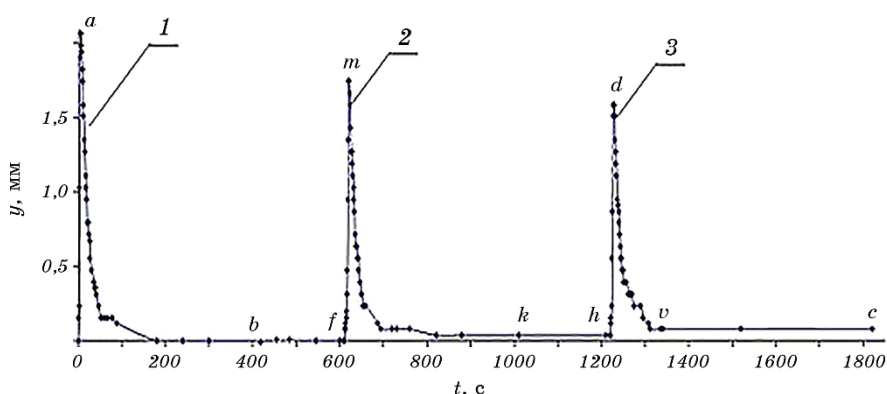
Під час подачі водню у робочу камеру реєстрували максимальний вигин пластини. У процесі подальшого насичення зразка воднем стріла вигину поступово зменшувалася і зразок повертався у початкове положення. Далі стріла вигину стабілізувалася і не змінювалася протягом подальшої витримки. Після такої витримки і одержання стопу паладій–водень з певною концентрацією водню у паладії проводили наступне насичення до певної концентрації, реєстрацію величини максимального вигину, залишкового вигину у разі повернення зразка у початкове положення та часу досягнення цих величин.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За описаною вище методикою виконано експерименти за температури 280°C, коли насичували чистий паладій до ступу  $\alpha\text{-PdH}_{0,0053}$ , а потім цей стоп до складу ступу  $\alpha\text{-PdH}_{0,0106}$  і стоп  $\alpha\text{-PdH}_{0,0106}$  до складу ступу  $\alpha\text{-PdH}_{0,0159}$  (рис. 1). Ці експерименти реалізували шляхом підвищення у робочій камері установки ВВУ-4 тиску водню від 0,01 до 0,089 МПа.

Розглянемо більш детально розшифровані відеодані експерименту за 280°C з кроком 1 с для одержання залежності максимального вигину пластини в перші секунди напуску водню у камеру та наступного розпрямлення пластини (рис. 2).

Як видно з рисунку 2, крива 1, змінення форми пластини здійснюється у два часових етапи. На першому етапі пластини швидко згинається, безпосередньо вже у процесі відкриття вентиля на установці за швидкості подачі водню  $3,6 \cdot 10^{-3}$  МПа/с у робочу камеру. Водночас в момент досягнення заданого тиску  $P_{\text{H}_2} = 0,011$  МПа ( $t = 3,0$  с) вигин пластини вже досягає експериментально помітної величини. Надалі за постійного тиску водню  $P_{\text{H}_2}$  зразок продовжує насичуватися воднем й інтенсивно згинатися. Стріла вигину досягає свого максимуму  $y_{\text{max}} = 2,06$  мм за проміжок часу  $\Delta t_{\text{max}} = 5,0$  с (рис. 2, крива 1, точка *a*) від початку подачі водню. Після досягнення максимального вигину (точка *a*), тобто на початку другого, більш тривалого етапу, зразок повільно закономірно розпрямляється. Це свідчить про поступове зменшення напружень у зразку в

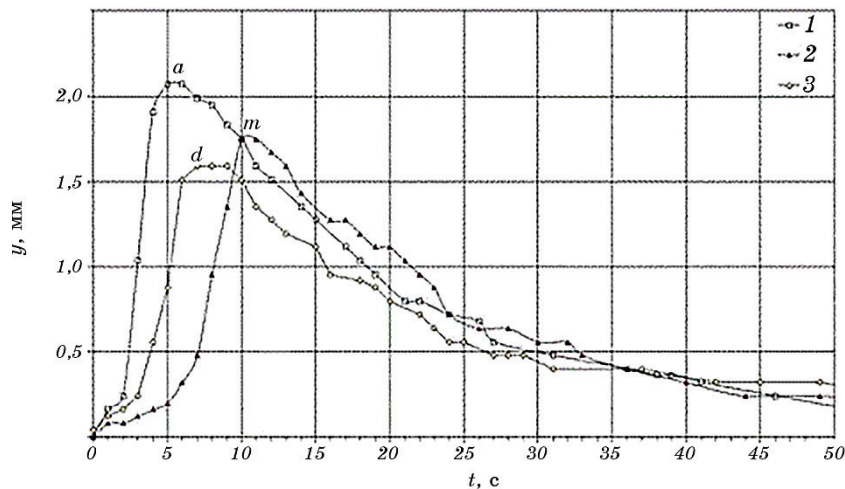


**Рис. 1.** Часова залежність стріли вигину пластини за 280°C та її одностороннього насичення воднем у разі зміни концентрації  $\Delta n = 0,0053$  для: 1 — чистого паладію, 2 —  $\alpha\text{-PdH}_{0,0053}$ , 3 —  $\alpha\text{-PdH}_{0,0106}$ .

**Fig. 1.** Time dependence of the bending arrow of the plate at 280°C and its unilateral hydrogen saturation at a change in the concentration  $\Delta n = 0.0053$  for: 1 — pure palladium, 2 —  $\alpha\text{-PdH}_{0,0053}$  alloy, 3 —  $\alpha\text{-PdH}_{0,0106}$  alloy.

результаті вирівнювання градієнта концентрації водню по перетинну зразка. Через 420 с від початку експерименту було досягнуто стаціонарного початкового стану ( $y_{\min} = 0,0$  мм), який надалі протягом 180 с до завершення експерименту залишався незмінним (рис. 1, крива 1, ділянка  $b-f$ ). Таким чином, експериментально встановлено, що вигин зразка повністю оборотний.

У другій частині експерименту (рисунок 2, крива 2) за описаною вище методикою насичували стоп  $\alpha$ -PdH<sub>0,0053</sub> до складу стопу  $\alpha$ -PdH<sub>0,0106</sub>, коли тиск водню у робочій камері установки ВВУ-4 було збільшено від 0,011 до 0,0435 МПа за швидкості подачі водню  $5,4 \cdot 10^{-3}$  МПа/с. Збільшення тиску водню не привело до істотної зміни кінетики формозміни пластини як на першому, так і на другому етапі її насичення воднем. Після закінчення напуску вигин продовжував збільшуватися і через 10 с від початку подачі водню у камеру було досягнуто меншого максимального вигину пластини:  $y_{\max} = 1,74$  мм (відмічений точкою  $m$  на кривій 2), ніж в першому експерименті. Другий етап почався з того, що максимальний вигин утримувався протягом 2 с (рис. 2, крива 2) і далі пластини почала розпрямлятися. Як бачимо, пластини розпрямляється (рис. 1, крива 2, ділянка  $k-h$ ) як і у першому експерименті. Кінетика протікання вигину пластини однакова, проте, як бачимо з рис. 1, крива 2, через 390 с після початку напуску спостерігається певне призупинення розпрямлення, яке з часом не змінюється. Час досягнення кінцевого стаціонарного вигину пластини склав 390 с за



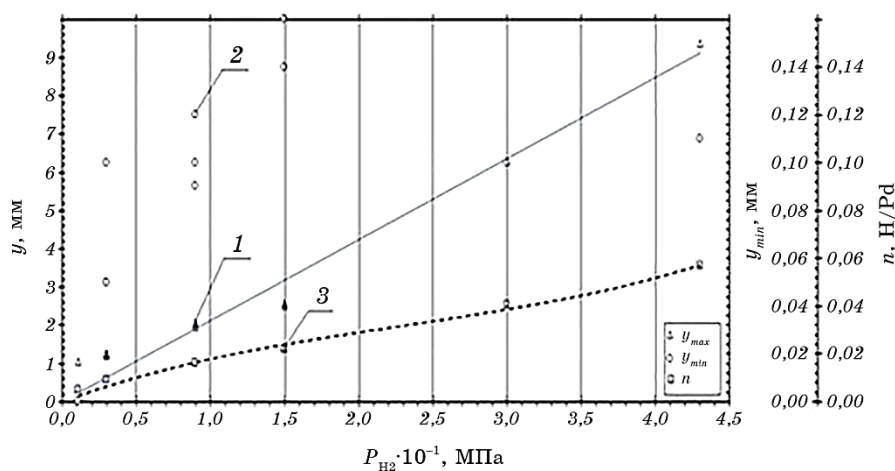
**Рис. 2.** Залежність стріли вигину пластини від часу насичення воднем для: 1 — чистого паладію, 2 — стопу  $\alpha$ -PdH<sub>0,0053</sub>, 3 — стопу  $\alpha$ -PdH<sub>0,0106</sub>.

**Fig. 2.** Dependence of the plate bending arrow on the time of hydrogen saturation for: 1—pure palladium, 2— $\alpha$ -PdH<sub>0.0053</sub> alloy, 3— $\alpha$ -PdH<sub>0.0106</sub> alloy.

$y_{\min} = 0,039$  мм (крива 2, ділянка  $k-h$ ) і під час додаткової витримки 210 с не змінився.

У третій частині експерименту (рис. 1, крива 3) за описаною вище методикою насичували стоп  $\alpha\text{-PdH}_{0,0106}$  до складу стопу  $\alpha\text{-PdH}_{0,0159}$ , коли тиск водню у робочій камері установки ВВУ-4 збільшили від 0,043 до 0,089 МПа за швидкості подачі водню  $17,8 \cdot 10^{-3}$  МПа/с. Як бачимо, збільшення тиску водню також не привело до зміни кінетики формозміни пластини як на першому, так і на другому етапі її насичення воднем. Після закінчення напуску вигин продовжував збільшуватися і через 5 с від початку подачі водню у камеру був досягнутий максимальний вигин пластини:  $y_{\max} = 1,58$  мм (відмічений точкою  $d$  на кривій, рис. 2), менший, ніж у першому та другому експериментах. Другий етап почався з того, що максимальний вигин утримувався протягом 3 с (рис. 2, крива 3) і далі пластини почала розпрямлятися. Як бачимо, пластини розпрямляється з такою ж швидкістю, як і у попередніх експериментах. Проте, як бачимо з рис. 1, крива 3, через 91 с після початку напуску спостерігається деяке призупинення розпрямлення. Час досягнення кінцевого стаціонарного вигину пластини  $y_{\min} = 0,079$  мм склав 600 с (рис. 3, крива 3, ділянка  $v-c$ ), і у перебігу додаткової витримки 600 с не змінився.

На нашу думку, така фізична природа формування максимального вигину пластини в перші секунди обумовлена формуванням



**Рис. 3.** Залежність максимального  $y_{\max}$  (1) і залишкового вигину  $y_{\min}$  (2) та концентрації водню в паладії (3) від тиску водню за  $T = 280^\circ\text{C}$ .

**Fig. 3.** The dependence of the maximum  $y_{\max}$  (1), residual bending  $y_{\min}$  (2) and the concentration of hydrogen in palladium (3) on the hydrogen pressure at  $T = 280^\circ\text{C}$ .

тимчасового градієнтного стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  (з певною концентрацією водню в паладії та товщиною), який має інші фізичні властивості, ніж чистий паладій по глибині проникнення водню [7].

Аналіз одержаних експериментальних результатів [8] формозміни пластини з паладію, яка спочатку не містить водень за  $280^\circ\text{C}$  та різних кінцевих значень тиску ( $P_{\text{H}_2}$ ) від 0,03 до 0,43 МПа представлено на рис. 3. Видно, що зі зростанням тиску водню від 0,03 до 0,43 МПа максимальна формозміна збільшується від 1,21 до 9,37 мм (рис. 3, крива. 1). Кінетика протікання процесу досягнення максимального вигину та протікання другого етапу розпрямлення аналогічна тій, яку наведено в експерименті, описаному на рис. 2, крива 1. Як видно (рис. 3, точки 2), за  $280^\circ\text{C}$  внесок максимального і залишкової формозміни у загальну формозміну паладієвої пластини істотно різняться. Залишкова формозміна ( $y_{\text{min}}$ ) з ростом тиску водню  $\Delta P_{\text{H}_2}$  спочатку зростає з 0,05 до 0,14 мм, а потім зменшується до 0,12 мм.

Цікавим є той факт, що зі зростанням тиску водню, незважаючи на зростання максимального вигину ( $y_{\text{max}}$ ), оборотність вигину збільшувалась, і за  $P_{\text{H}_2} = 0,43$  МПа і  $y_{\text{max}} = 9,35$  мм вигин пластини виявився практично повністю оборотним (0,12 мм).

У разі одностороннього насичення воднем Pd-пластини виникають градієнти концентрації водню, бо водень, який розчинений в паладії, розширює кристалічну ґратницю. Водночас виникають градієнти розширення кристалічної ґратниці. Відповідно, у металі генеруються концентраційні (градієнтні) водневі напруження, які є причиною вигину консольно закріпленої пластини. Тому можна вважати, що максимальний вигин пластини відповідає максимальному рівню виникнення внутрішніх градієнтних напружень в пластині. Це добре ілюструє крива 1 на рис. 3 — чим вище тиск водню в камері, тим вище максимальний вигин пластини. Виникає закономірне питання: яким чином та скільки триває процес формування стопу паладію з воднем з різною концентрацією водню?

У процесі насичення відбувається формування шарів в пластині паладію з різною концентрацією водню в паладії ( $c_1, c_2, \dots, c_{N-1}, c_N$ ) та довжиною шарів від  $l(0)$  до  $l(h)$ , де  $h$  — початкова товщина 0,27 мм,  $l(0)$  — початкова довжина 68 мм. Формування тимчасового градієнтного стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  схематично можна зобразити на рис. 4.

Відповідно до такої моделі, коли пластина насичується воднем та виникає вигин, кожен шар пластини вигинається і у ньому виникають напруження стискання, а в іншому шарі напруження розтягнення. Але відносно видовження шарів в районі з'єднання шарів має однакову величину. Розділимо в уяві наш зразок у формі пластини на декілька різнорідних шарів (пластин). Тоді одна з них (пластина 1), яка прилегла до вхідної поверхні зразка, є автолокалізованим шаром градієнтного стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  товщиною  $h_1$ , яка зростає з

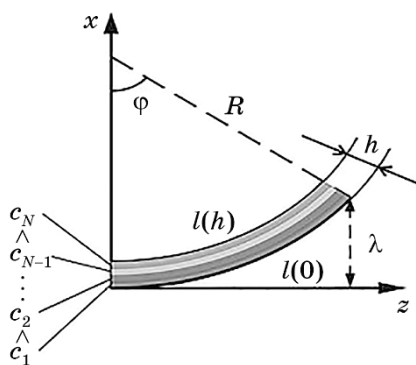


Рис. 4. Схема вигину пластини паладію.

Fig. 4. The scheme of the palladium plate bending.

часом. Цей шар насичений воднем до концентрації  $c_1$ , близької до рівноважної концентрації  $n_0$  за даних  $T$  і  $P_{H_2}$ .

Повернемося до результатів експерименту, представленого на рис. 2, крива 1. Приймаємо час формування автолокалізованого шару градієнтного ступу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> (пластина 1) рівним часу  $t = 5$  с, за який досягається максимальний вигин пластини. Товщину цього шару розраховують за рівнянням [9]:

$$h_1 = X = 2w\sqrt{D_0t},$$

де  $D_0$  — коефіцієнт дифузії водню у паладії ( $D_0 = 2,78 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с за 280°C [10]),  $t$  — час досягнення максимального вигину,  $w$  — константа ( $w = X/(2(D_0t)^{1/2})$ ), яка визначає рух фронту дифузанта з кінцевою швидкістю (рис. 5) [9].

З рисунка 5 бачимо, що крива 1 ( $w = 0,36$ ) за  $n/n_0 = 0$  на першому

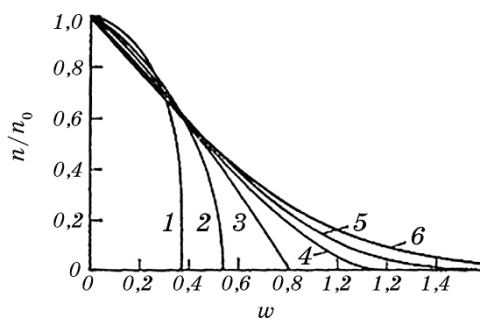


Рис. 5. Значення концентрації  $n/n_0$  як функції  $w$  [9].

Fig. 5. The value of the concentration  $n/n_0$  as a function of  $w$  [9].



етапі насичення пластини воднем в момент досягнення максимального вигину пластини добре моделює формування і зростання тимчасового автолокалізованого градієнтного шару ступу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub>.

Розрахунок дає для автолокалізованого шару градієнтного ступу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> товщину  $h_1 = 84,8$  мкм.

Товщину шару  $h_2$ , який не містить водень, можемо знайти за допомогою рівняння

$$h_2 = h - h_1,$$

де  $h = 0,27$  мм — це товщина досліджуваної пластини.

Відповідно, для цього випадку товщина пластини 2, ненасиченої воднем, становить  $h_2 = 185,2$  мкм. Як бачимо, за заданих  $P_{H_2}$  і  $T$  товщина шару  $h_1$  ступу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> в момент досягнення  $y_{\max}$  визначається часом досягнення максимального вигину, вмістом водню у паладії, коефіцієнтом дифузії водню у паладії, який за постійної температури 280°C залишається незмінним, подовження  $\Delta l$  шару 1 градієнтного ступу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub>.

Становить інтерес оцінити товщини пластин 1 і 2 автолокалізованого градієнтного ступу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> в момент досягнення максимального вигину для отриманих експериментальних даних за 280°C, які представлено на рис. 3. Розраховані значення представлено в табл. 1.

Оцінимо параметр швидкості проникнення водню через поверхню вглиб паладію  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{h}{t_{\max}} = \frac{0,027 \cdot 10^{-3}}{5} = 5,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**ТАБЛИЦЯ 1.** Експериментальні та розраховані показники для паладієвої пластини.

**TABLE 1.** Experimental and calculated indicators for the palladium plate.

№	$P_{H_2}$ , МПа	$n$ , H/Pd	$t_{\max}$ , с	$Y_{\max}$ , мм	$Y_{\min}$ , мм	$t_{\min}$ , с	$\gamma \cdot 10^{-5}$ , м/с	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$\lambda = y_{\max}$ , мм
1	0,11	0,0050	5	1,06	0	180	5,40	84,89	185,11	0,66
2	0,3	0,0090	11	1,21	0,05	960	2,45	125,91	144,09	1,53
3	0,3	0,0090	6	1,24	0,05	1610	4,50	92,99	177,01	1,24
4	0,3	0,0090	11	1,28	0,10	900	2,45	125,91	144,09	1,53
5	0,9	0,0162	15	1,95	0,12	1144	1,80	147,03	122,97	3,22
6	0,9	0,0162	16	2,03	0,09	1170	1,69	151,85	118,15	3,36
7	0,9	0,0162	10	2,08	0,10	1500	2,70	120,05	149,95	2,64
8	1,5	0,0220	15	2,58	0,16	1075	1,80	147,03	122,97	4,38
9	1,5	0,0220	12	2,5	0,14	2040	2,21	132,54	137,46	3,92
10	3	0,0406	8	6,3	0,10	602	3,38	107,24	162,76	6,11
11	4,3	0,0567	11	9,37	0,11	267	2,45	125,91	144,09	9,63

Визначимо за допомогою рівняння, наведеного в [11], максимально можливе теоретичне значення стріли вигину пластини, згідно рис. 4:

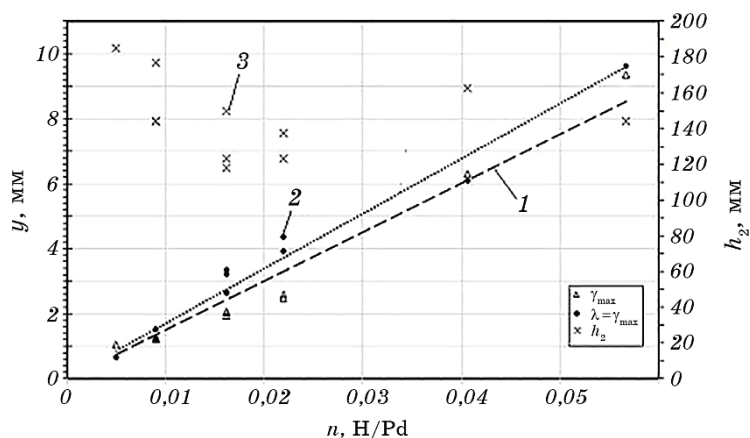
$$\lambda = 2R \sin^2 \frac{l}{2R} \approx \frac{l^2}{2R} = \frac{\alpha(c_s - c_m)l^2}{h},$$

де  $\alpha = 0,068$  — коефіцієнт, який враховує вміст водню в паладії,  $c_s - c_m = c_e = n$  — рівноважна концентрація водню в паладії за заданих умов ( $T, P_{H_2}$ ),  $l = 0,06$  м — довжина пластини, яку використовуємо в експерименті.

Продовжуючи порівняння цих оцінок з нашою теоретичною моделлю, одержані значення теоретичного максимального вигину (стовбець 11) занесемо до табл. 1.

Цікаво проаналізувати (рис. 6), чи є залежність між концентрацією водню в паладії та товщиною автолокалізованого шару стопу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub>.

У результаті аналізу одержаних графіків рисунку 6 (криві 1 та 2) бачимо, що одержані в експерименті (крива 1) та розраховані (крива 2) значення максимального вигину пластини знаходяться в межах похибки. Розбіжність цих даних, на нашу думку, пов'язана з особливостями перебігу процесу вигину і вимірюваннями під час експерименту (у табл. 1 наведено, що деякі експерименти повторювали по декілька разів № 2–4, № 5–7), та з іншими фізичними чинниками.



**Рис. 6.** Залежність максимального вигину, одержаного експериментально (1) і розрахованого (2), та товщини шару паладієвої пластини без водню (3) від вмісту водню у паладії за  $T = 280^\circ\text{C}$ .

**Fig. 6.** The dependence of the maximum experimental bend (1), the calculated maximum bend (2) and the thickness of the layer of hydrogen free palladium plate (3) on the hydrogen content in palladium at  $T = 280^\circ\text{C}$ .

Згідно з описаною нами раніше методикою розрахунку водню у паладії [12] залежно від концентрації водню у паладії утворюються три області: ідеальних, псевдоідеальних і неідеальних рівноважних твердих розчинів водню. Перша знаходиться в межах від 0 до  $n = 0,01$  Н/Pd, друга від  $n = 0,01$  Н/Pd до  $n = 0,02$  Н/Pd, а третя від  $n \geq 0,02$  Н/Pd до  $n$ , яка відповідає критичному тиску  $P_{кр}$  за заданої температури.

Як бачимо з рисунка 6 (криві 1 та 2), для цих трьох областей залежність максимального вигину від концентрації зберігається.

Цікавими є результати залежності товщини шару  $h_2$  паладієвої пластини без водню (рис. 3, точки 3) від вмісту водню в паладії за  $T = 280^\circ\text{C}$ . І як бачимо, збільшення товщини  $h_1$  автолокалізованого шару стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  (див. табл. 1, стовбець 9) та зменшення товщини  $h_2$  (див. табл. 1, стовбець 10) відбувається саме в області ідеальних та псевдоідеальних твердих розчинів водню в паладії ( $n = 0,002$  Н/Pd) (див. табл. 1, стовбець 3), але водночас спостерігається значне підвищення оборотного максимального вигину пластини (стовбець 6).

Така поведінка формування автолокалізованого шару градієнтного стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  під час досягнення максимального вигину пластини потребує продовження аналізу експериментальних даних за інших температур для різних концентрацій водню у паладії. Це допоможе сформулювати чітке уявлення про механізм формування цього автолокалізованого шару стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  в різних областях утворення рівноважних твердих розчинів водню в паладії.

Можна висловити наступне припущення: фізична природа досліджуваного нами явища полягає у тому, що в процесі насичення воднем у металі формується і «працює» на вигин тимчасовий когерентний пружно напружений градієнтний однофазний стоп  $\alpha\text{-PdH}_n$ , де  $n$  — це змінна величина вмісту водню по глибині  $h$  проникнення водню. Відповідно, модуль градієнта концентрації водню  $dH_n/dh$  для градієнтного стопу  $\alpha\text{-PdH}_n$  утворюється і постійно змінюється у процесі насичення воднем та викликає формозміну пластини та визначається закономірностями проникнення водню (зокрема швидкістю проникнення, коефіцієнтом дифузії, концентрацією водню та часом досягнення максимальних воднево-концентраційних напружень у пластині) за даних експериментальних умов. Кінцеве уявлення про перебіг цього процесу залишається ще остаточно не вичиним, тому наші наступні роботи буде присвячено такому експериментальному і теоретичному вивченню.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Вперше проведено дослідження та аналіз відеозапису експерименту вигину пластини з паладію за підвищеної концентрації водню в паладії на  $\Delta n = 0,0053 = \text{const}$  за температури  $280^\circ\text{C}$ , коли насичували чис-

тий паладій та відбувалося утворення ґрадієнтних стопів  $\alpha$ -PdH<sub>0,0053</sub>,  $\alpha$ -PdH<sub>0,0106</sub> та  $\alpha$ -PdH<sub>0,0159</sub>.

2. Проаналізовано та встановлено, що вигин паладієвої пластини у разі додаткового насичення воднем за 280°C також складається з етапу досягнення максимального вигину та наступного більш тривалого етапу розпрямлення пластини.

3. Вперше експериментально показано, що за 280°C максимальні вигини пластини з ростом концентрації на  $\Delta n = 0,0053$  під час кожного наступного зростання концентрації водню зменшуються, та вигини пластини залишаються оборотними.

4. Висловлено припущення, що особлива фізична природа формування в перші секунди максимального вигину пластини обумовлена формуванням тимчасового ґрадієнтного стопу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> з певною товщиною, який має інші фізичні властивості, ніж чистий паладій.

5. Вперше встановлено, що за  $T = 280^\circ\text{C}$  товщина шару без водню паладієвої пластини під час формування ґрадієнтного стопу  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> залежить від вмісту водню в паладії та зменшення величини цієї товщини відбувається саме в області ідеальних та псевдоідеальних твердих розчинів водню у паладії, але водночас спостерігаємо значне підвищення оборотного максимального вигину пластини.

Автори висловлюють подяку доценту М. В. Гольцовій за допомогу у проведенні експерименту та здійсненні відеозапису експерименту.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Progress in Hydrogen Treatment of Materials* (Ed. V. A. Goltsov) (Donetsk: Kassiopeya Ltd.: 2001), p. 543.
2. V. A. Goltsov, *Progress in Hydrogen Treatment of Materials* (Ed. V. A. Goltsov) (Donetsk: Kassiopeya Ltd.: 2001), p. 3.
3. А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов, А. М. Мамонов, *Водородная технология титановых сплавов* (Ред. А. А. Ильин) (Москва: МИСиС: 2002).
4. M. Okada, A. Kamegawa, J. Nakahigashi, A. Yamaguchi, A. Fujita, and M. Yamauchi, *Mater. Sci. and Eng.*, **173**, No. 1–3: 253 (2010).
5. Ж. Л. Глухова, В. А. Гольцов, Т. А. Щеголева, Е. Н. Любименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 3: 333 (2009).
6. В. А. Гольцов, Е. Н. Любименко, Ж. Л. Глухова, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **45**, № 5: 55 (2009).
7. М. В. Гольцова, Е. Н. Любименко, Г. Н. Толмачева, Г. И. Жиров, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 8: 1135 (2015).
8. Е. Н. Любименко, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **48**, № 1: 83 (2012).
9. А. И. Райченко, *Математическая теория диффузии в приложениях* (Киев: Наукова думка: 1981).
10. Е. Э. Вике, Х. Бродовский, *Водород в металлах* (Ред. Г. Алефельд, И. Фелькль) (Москва: Мир: 1981), т. 2, с. 91.
11. E. P. Feldman, E. N. Lyubimenko, and K. V. Gumennyk, *J. Applied Physics*,

- 127, No. 24: 245104 (2020).
12. М. В. Гольцова, Е. Н. Любименко, *Физ. мет. металловед.*, **113**, № 11: 1173 (2012).

## REFERENCES

1. *Progress in Hydrogen Treatment of Materials* (Ed. V. A. Goltsov) (Donetsk: Kassiopeya Ltd.: 2001), p. 543.
2. V. A. Goltsov, *Progress in Hydrogen Treatment of Materials* (Ed. V. A. Goltsov) (Donetsk: Kassiopeya Ltd.: 2001), p. 3.
3. A. A. Il'in, B. A. Kolachev, V. K. Nosov, and A. M. Mamonov, *Vodorodnaya Tekhnologiya Titanovykh Splavov* [Titanium Alloy Hydrogen Technology] (Ed. A. A. Il'in) (Moscow: MISiS: 2002) (in Russian).
4. M. Okada, A. Kamegawa, J. Nakahigashi, A. Yamaguchi, A. Fujita, and M. Yamauchi, *Mater. Sci. and Eng.*, **173**, No. 1–3: 253 (2010).
5. Zh. L. Glukhova, V. A. Gol'tsov, T. A. Shchegoleva, and E. N. Lyubimenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **31**, No. 3: 333 (2009) (in Russian).
6. V. A. Gol'tsov, E. N. Lyubimenko, and Zh. L. Glukhova, *Physicochemical Mechanics of Materials*, **45**, No. 5: 55 (2009) (in Russian).
7. M. V. Gol'tsova, E. N. Lyubimenko, G. N. Tolmacheva, and G. I. Zhiron, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 8: 1135 (2015) (in Russian).
8. E. N. Lyubimenko, *Physicochemical Mechanics of Materials*, **48**, No. 1: 83 (2012) (in Russian).
9. A. I. Raychenko, *Matematicheskaya Teoriya Diffuzii v Prilozheniyakh* [Mathematical Theory of Diffusion in Applications] (Kyiv: Naukova Dumka: 1981) (in Russian).
10. E. E. Vike and Kh. Brodovskiy, *Vodorod v Metallakh* [Hydrogen in Metals] (Eds. G. Alefeld and J. Völkl) (Moscow: Mir: 1981), vol. 2, p. 91 (in Russian).
11. E. P. Feldman, E. N. Lyubimenko, and K. V. Gumennyk, *J. Applied Physics*, **127**, No. 24: 245104 (2020).
12. M. V. Gol'tsova and E. N. Lyubimenko, *Fiz. Met. Metalloved.*, **113**, No. 11: 1173 (2012) (in Russian).