

PACS numbers: 46.70.De, 61.72.jj, 61.72.S-, 61.72.up, 66.30.jp, 68.35.Fx, 68.35.Gy

## **Формоизменение палладиевой пластины, индуцированное малыми односторонними водородными воздействиями**

Е. Н. Любименко, М. В. Гольцова

*Донецкий национальный технический университет,  
ул. Артёма, 58,  
83001 Донецк, Украина*

Экспериментально исследовано формоизменение палладиевой пластины при её одностороннем насыщении водородом при температуре 320°C в широком интервале давлений  $P_{H_2} = 0,01-0,3$  МПа. Подтверждено, что формоизменение пластины развивается в два этапа: на первом этапе пластина весьма быстро достигает максимального изгиба, а на втором, существенно более длительном этапе, пластина распрямляется практически полностью обратимо. Установлена нелинейная зависимость от давления максимальной стрелы прогиба пластины в области малых давлений водорода, соответствующих образованию идеальных и псевдоидеальных растворов водорода в палладии. Обсуждена физическая природа установленных экспериментальных закономерностей и подтверждена работоспособность разработанной ранее феноменологической модели.

Експериментально досліджено формозмінення палладієвої пластины при її односторонньому насиченні воднем при температурі 320°C в широкому інтервалі тисків  $P_{H_2} = 0,01-0,3$  МПа. Підтверджено, що формозмінення пластины розвивається в два етапи: на першому етапі пластина досить швидко досягає максимального вигину, а на другому, більш тривалому етапі, відбувається практично повне розпрямлення пластины. Встановлено нелінійну залежність від тиску максимальної стріли вигину пластины в області малого тиску водню, що відповідає утворенню ідеальних, псевдоідеальних розчинів водню в паладії. Обговорено фізичну природу встановлених експериментальних залежностей і підтверджено працездатність розвиненої раніше феноменологічної моделі.

The palladium plate form changing during its one-side saturation with hydrogen at temperatures 320°C in a wide range of pressures,  $P_{H_2} = 0.01-0.3$  MPa, is experimentally studied. There is confirmed that the form changing of the plate is developed in two stages. At the first stage, the plate quickly reaches its maximum bending. At the second one, much longer than first, the plate straightens. This straightening is almost completely reversible. As re-

vealed, the maximum deflection of the plate depends nonlinearly on the hydrogen pressure in those cases when hydrogen pressures are low. This dependence corresponds to the formation of the ideal and pseudo-ideal solutions of hydrogen in palladium. The physical nature of the discovered experimental dependences is discussed. Efficiency of the previously developed phenomenological model is confirmed.

**Ключевые слова:** формоизменение, палладиевая пластинка, растворы Pd–H.

*(Получено 6 июня 2013 г.; окончат. вариант — 29 января 2014 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–4] изучено формоизменение палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом в изотермических условиях в интервале температур от 110°C до 350°C и давлении водорода меньше критического значения ( $\alpha$ -область диаграммы состояния Pd–H, см. в [5]). Установлено [1–4], что реакция палладиевой пластины на водородное воздействие развивается во времени в два принципиально различных этапа: на первом этапе пластина весьма быстро достигает максимального изгиба. А на втором — существенно более длительном этапе, пластина распрямляется практически полностью обратимо (либо возвращается в исходное состояние либо достигает некоторого стационарного состояния с весьма малым отклонением от исходного состояния).

Установленные закономерности индуцированного водородом формоизменения [1–4] проанализированы на основе современных представлений о физике взаимодействия водорода с металлами [6] и с учетом того экспериментального факта, что внедренный «атом» водорода расширяет кристаллическую решетку палладия ( $\Delta L/L = 0,068c$ , где  $c$  — это атомная концентрация водорода в палладии) [5].

Физические причины формоизменения (изгиба и последующего распрямления) пластины, согласно развиваемой фенологической модели [1–4], состоят в следующем. В процессе одностороннего насыщения водородом на первом этапе (до достижения максимального изгиба) в пластине формируется и быстро растет самолокализованный «слой» градиентного сплава  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> (слой 1), формирующийся у входной поверхности пластины и имеющий большую длину, чем длина слоя 2 пластины, пока еще не насыщенного водородом. Очевидно, что свободная палладиевая пластина, претерпевающая такую трансформацию строения, сопровождающуюся возникновением внутренних напряжений, неизбежно претерпевает изгиб. В этом состоит механическая компонента развитой модели [1–4].

Физическая компонента модели [1–4] рассматривает физические основы установленных закономерностей быстрого достижения и

величины максимального изгиба, медленного развития последующего распрямления пластины и т.д.

Для дальнейшего осмысления индуцированного водородом формоизменения металлических изделий и оборудования (термоядерные реакторы, технологии водородной энергетики, современная техника) необходимо комплексное целевое экспериментальное изучение явления. В частности представляет интерес экспериментально изучить явление изгиба палладиевой пластины в условиях меньшего водородного воздействия, чем это было сделано в [1–4].

В свете вышесказанного в работе была поставлена задача изучить формоизменение палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом при постоянной температуре и при постепенно уменьшающихся от эксперимента к эксперименту давлениях водорода, обеспечивающих насыщение пластины водородом в условиях, соответствующих все более малым значениям равновесной растворимости водорода в палладии.

## 2. МАТЕРИАЛ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследований служил палладий чистотой 99,98% в виде тонкой пластины (68×5,5×0,27 мм). Образец предварительно отжигали при 700°C в течение 1 часа в вакууме. Далее на одну сторону образца электролитически наносили медное покрытие толщиной 0,75 мкм и закрепляли в держателе рабочей камеры водородо-вакуумную установку ВВУ-4 [7], таким образом, чтобы сверху была сторона образца с медным покрытием (рабочая часть образца составляла 60 мм). Для снятия остаточных напряжений закреплённый образец подвергали низкотемпературному вакуумному отжигу в рабочей камере.

Эксперименты проводили в следующем порядке. Образец медленно (3°C/мин) нагревали до температуры эксперимента и выдерживали при этой температуре 20 мин. После этого в рабочую камеру подавали диффузионно очищенный водород (99,99%) до заданного давления. От начала подачи водорода ( $t = 0$  с) вели регистрацию изменения стрелы прогиба образца через кварцевое окно с помощью катетометра и видеокамеры Samsung.

Эксперименты всегда осуществляли в изотермических условиях (с точностью  $\pm 1$  К). Полученные видеозаписи затем анализировали кадр за кадром, что позволяет получить зависимость стрелы прогиба образца от времени с покадровой точностью (0,04 с). Использование видеозаписи особенно важно для первых секунд эксперимента, когда формоизменение образца развивается весьма быстро.

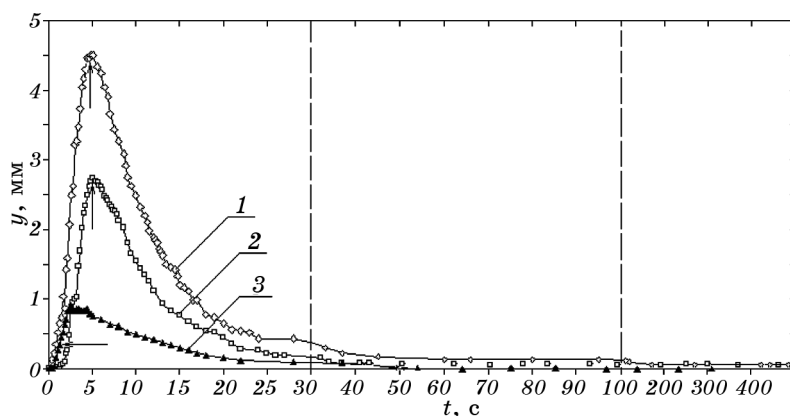
В настоящей работе использована разработанная нами методика [1] оценки равновесной растворимости водорода в палладии ( $n_0$ ), как функции давления газообразного водорода при заданной темпера-

туре:  $n_0 \sim f(P_{H_2})$ , где  $n_0$  — равновесная концентрация (растворимость) водорода в палладии, измеряемая атомным отношением  $H/Pd$ . Разработанная методика основана на работах [8–9]. Изложенная методика [1] позволяет оценивать равновесную растворимость водорода в палладии, знание которой необходимо для анализа экспериментально установленных закономерностей индуцированного водородом формоизменения палладиевой пластины.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с поставленной задачей эксперименты были выполнены при  $320^\circ C$ . Выбор этой температуры был обусловлен тем, что она позволила осуществлять эксперименты при давлениях водорода, обеспечивающих насыщение пластины водородом до его равновесной растворимости в палладии в области неидеальных растворов ( $n_0 \geq 0,02$ ), в переходной области ( $0,01 < n_0 < 0,02$ ) и в области идеальных растворов ( $n_0 \leq 0,01$ ). Результаты трех представительных экспериментов обобщены на рис. 1.

В первом эксперименте (кривая 1) водород подавали в рабочую камеру установки до его конечного давления  $P_{H_2} = 0,3$  МПа, которому соответствует рассчитанная равновесная концентрация водорода в палладии  $n_0 = 0,03347$ , соответствующая области неидеальных растворов водорода в палладии. Во втором эксперименте (кривая 2) конечное давление водорода было равно  $P_{H_2} = 0,128$  МПа, а  $n_0 = 0,01599$ , что соответствует переходной области концентраций псевдо-идеальных растворов водорода в палладии. В третьем эксперименте (кривая 3) конеч-



**Рис. 1.** Временная зависимость стрелы прогиба пластины при ее одностороннем насыщении водородом при  $320^\circ C$ . Конечное давление водорода: 1 —  $P_{H_2} = 0,3$  МПа, 2 —  $P_{H_2} = 0,128$  МПа, 3 —  $P_{H_2} = 0,01$  МПа. Стрелками отмечены моменты достижения указанных конечных давлений водорода.

ное давление водорода было уменьшено до 0,01 МПа, чему соответствует рассчитанная равновесная концентрация водорода  $n_0 = 0,00425$ , соответствующая области идеальных растворов водорода в палладии.

Принципиально важно, что во всех экспериментах (рис. 1), выполненных в условиях сильно различающихся по интенсивности водородного воздействия подтверждаются ранее установленные [1–4] закономерности: реакция палладиевой пластины на водородное воздействие развивается во времени в два принципиально различных этапа: на первом из которых пластина очень быстро ( $\cong 2-5$  с) изгибается и достигает максимальной стрелы прогиба, а на втором этапе пластина исключительно медленно ( $\cong 50-200$  с) практически полностью (эксперимент 1 и 2) или вполне полностью (эксперимент 3) распрямляется.

Последнее обстоятельство, — полное или практически полное распрямление пластины во всех трех экспериментах (рис. 1), — показывает, что изучаемое явление индуцированного водородом формоизменения металла при насыщении его водородом до равновесия есть обратимое явление вне зависимости от природы образующегося при этом твердого раствора водорода: неидеальный, псевдоидеальный или идеальный раствор.

Остановимся теперь на другом важном результате описанных выше экспериментов (рис. 1). В первом эксперименте при  $P_{H_2} = 0,3$  МПа максимальный изгиб достигал весьма большой величины  $y_{max} = 4,5$  мм. Во втором эксперименте давление водорода было уменьшено до  $P_{H_2} = 0,128$  МПа, т.е. в 2,34 раза. Однако максимальный изгиб при этом уменьшился только в 1,67 раза и составил величину  $y_{max} = 2,7$  мм. Удивительный результат был получен в третьем эксперименте. Давление водорода по сравнению со вторым экспериментом было уменьшено в  $\cong 13$  раз и составляло лишь  $P_{H_2} = 0,01$  МПа, однако максимальный изгиб в этом эксперименте составил достаточно большую величину  $y_{max} = 0,9$  мм, т.е. изгиб уменьшился по сравнению с таковым во втором эксперименте всего лишь в 3 раза. Таким образом, в выполненных экспериментах явно наметилась нелинейная зависимость максимального изгиба пластины от давления водорода, подаваемого в рабочую камеру.

В связи с вышеописанным экспериментальным результатом представляло интерес выполнить дополнительную серию экспериментов, позволяющих уточнить зависимость максимального изгиба пластины от давления водорода в области малых водородных воздействий (от  $P_{H_2} = 0,3$  МПа до  $P_{H_2} = 0,01$  МПа, обеспечивающих при  $320^\circ\text{C}$  образование принципиально различных твердых растворов водорода в палладии).

Результаты выполненных экспериментов обобщены в таблице, в которую также внесена информация об экспериментах представленных на рис. 1. Как видно из таблицы, эксперименты 1–3 выполнены при давлениях водорода, которым при установлении равновесия соответствуют неидеальные твердые растворы водорода в пал-

**ТАБЛИЦА.** Условия и результаты экспериментов по изучению влияния величины давления водорода на формоизменение Pd-пластинки при 320°C.  $P_{H_2}$  — конечное давление водорода, подаваемого в рабочую камеру,  $\Delta\tau_H$  — время напуска водорода до заданного давления,  $\Delta\tau_{max}$  — время достижения максимального изгиба  $y_{max}$ ,  $\Delta\tau_{ст}$  — время достижения стационарного состояния  $y_{ст}$ ,  $\Delta\tau_{доп}$  — время дополнительной выдержки, после достижения стационарного состояния,  $n_0$  — расчетные значения равновесной растворимости водорода в палладии при 320°C и заданных значениях  $P_{H_2}$ .

№	$P_{H_2}$ , МПа	$\Delta\tau_H$ , с	$\Delta\tau_{max}$ , с	$y_{max}$ , мм	$\Delta\tau_{ст}$ , с	$y_{ст}$ , мм	$\Delta\tau_{доп}$ , с	$n_0$ (H/Pd)
1	0,3	5,5	5,5	4,5	180	0,1	320	0,03347
2	0,248	3	5	3,9	50	0	250	0,02689
3	0,212	2,58	2,58	3,3	660	0	60	0,02233
4	0,19	5	5	3,1	58	0	242	0,0198
5	0,168	7,2	6,85	2,9	240	0	360	0,01853
6	0,15	6,01	5,55	2,8	240	0,1	360	0,01743
7	0,128	5,03	5,04	2,7	185	0,1	295	0,01599
8	0,112	3,56	3,56	2,6	47	0	253	0,01486
9	0,09	4,03	7,03	2,4	54	0	246	0,01317
10	0,065	3,4	4,4	2,1	41	0	290	0,01098
11	0,05	1	5	1,9	56	0	120	0,00951
12	0,04	2,15	3,11	1,8	62	0	238	0,00851
13	0,021	1,22	3,02	1,2	58	0	242	0,00616
14	0,01	1,1	2,1	0,9	54	0	246	0,00425

ладии ( $n_0 \geq 0,02$ ). Эксперименты 4–10 выполнены при давлениях водорода в переходной области, которой соответствуют псевдо-идеальные растворы водорода в палладии.

Эксперименты 11–14 выполнены при столь низких давлениях водорода, что в условиях равновесия им соответствуют идеальные растворы водорода в палладии ( $n_0 < 0,01$ ). В начале отметим, что в большинстве экспериментов (см. колонку 6 таблицы) формоизменение пластины было полностью обратимым ( $y_{ст} = 0$ ). В трех случаях (эксперименты 1, 6, 7) имеет место остаточный изгиб равный лишь  $y_{ст} = 0,1$  мм, что составляет малую долю от максимальных изгибов пластины, имевших место в этих экспериментах.

Итак, обобщая, констатируем, что формоизменение (изгиб и распрямление) палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом до малых равновесных концентраций водорода (в нашем случае до  $n_0 \leq 0,03$ ) есть явление полностью обратимое. Это означает, что насыщение водородом свободной палладиевой пластины в таких условиях может рассматриваться как чисто упругое

явление. Отсюда следует, что явление индуцированного водородом формоизменения металла при малых водородных воздействиях может быть теоретически описано на основе теории упругости в рамках такой модели водородоупругости [10], в которой эффект расширения атомами водорода кристаллической решетки металла принимается как первый принцип.

Обсудим далее этот фундаментальный экспериментальный результат в рамках феноменологической модели индуцированного водородом формоизменения металла [1–4]. Суть разработанной модели состоит в ниже следующем.

В процессе одностороннего насыщения водородом на первом его этапе (до достижения максимального изгиба) в пластине (исходная длина  $l$ , толщина  $h$ ) формируется и быстро растет слой самолокализованного когерентного, упруго напряженного градиентного сплава  $\alpha$ -PdH<sub>*n*</sub> (слой 1). Вследствие того, что водород расширяет кристаллическую решетку палладия слой 1, формирующийся у входной поверхности пластины, в частности, имеет длину  $l + \Delta l$ , большую, чем длина  $l$  слоя 2 пластины, пока еще не насыщенного водородом. Очевидно, что свободная палладиевая пластина, претерпевающая такую трансформацию строения, сопровождающуюся возникновением внутренних напряжений, неизбежно претерпевает изгиб. В этом состоит, как отмечалось во введении, механическая компонента модели развитой в [1–4]. Физическая компонента модели рассматривает феноменологические «тонкости» явления [1–4]. Обсудим далее физические факторы, определяющие величину максимального изгиба пластины. Итак, достигаемый в данных экспериментальных условиях максимальный изгиб пластины определяется параметрами сформировавшегося к этому моменту слоя градиентного самолокализованного упруго напряженного, когерентного сплава  $\alpha$ -PdH<sub>*n*</sub> (слой 1). Этот слой характеризуется двумя параметрами (толщиной  $h$  и удлинением  $\Delta l$ ).

Толщина  $h$  слоя градиентного сплава  $\alpha$ -PdH<sub>*n*</sub> (слой 1), образующегося к моменту достижения максимального изгиба пластины, определяется коэффициентом диффузии водорода в палладии при данной температуре [1]. Толщина  $h$  этого слоя 1 может быть оценена количественно на основе принятой модели [1] с использованием выражения:

$$h = 2W\sqrt{D_0 t}; \quad (1)$$

$D_0$  — «идеальный» коэффициент диффузии водорода в палладии, т.е. коэффициент диффузии водорода в бесконечно разбавленном твердом растворе палладий–водород,  $t$  — время достижения пластиной максимального изгиба,  $W$  — согласно [11] определяет скорость движения фронта диффузанта с конечной скоростью. При сильной самолокализации градиентного сплава  $\alpha$ -PdH<sub>*n*</sub>  $W \geq 0,36$

определяет скорость движения его фронта [11].

В нашей работе эксперименты выполнены при одной температуре  $T = 320^\circ\text{C}$  и  $D_0 = \text{const}$ . Соответственно, фактор толщины слоя сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$  в момент достижения  $y_{\text{max}}$  в дальнейшем анализе мы не рассматриваем.

Удлинение  $\Delta l$  слоя 1 (градиентный сплав  $\alpha\text{-PdH}_n$ ) определяется средним содержанием в нем водорода  $n_0$  в момент достижения пластиной максимального изгиба. В учении о взаимодействии водорода с металлами [6, 12] твердо установлено, что многостадийный процесс проникновения водорода в палладий при температурах выше  $100^\circ\text{C}$  и при хорошо активированной поверхности металла всегда контролируется диффузией водорода в объеме металла: иными словами при насыщении металла водородом в «диффузионном режиме» скорость поверхностных процессов (адсорбция водорода и его переход в приповерхностный слой металла) оказывается много больше скорости диффузионного отвода водорода вглубь металла. Соответственно, при контакте газообразного водорода с палладием в его приповерхностном слое практически сразу достигается (и далее сохраняется) концентрация растворенного водорода, практически равная равновесной растворимости водорода при данных  $P_{\text{H}_2}$  и  $T$ .

Учитывая сказанное, а также принимая во внимание самолокализацию формирующегося градиентного сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$  [1], можно полагать, что концентрация в нем водорода ( $n$ ) в момент достижения пластиной максимального изгиба вполне соизмерима с величиной равновесной растворимости водорода в палладии ( $n \approx n_0$ ). Основываясь на этом можно было ожидать однотипность зависимости от давления водорода двух величин: экспериментальной величины максимальной стрелы прогиба пластины ( $y_{\text{max}} = f(P_{\text{H}_2})$ ) и расчетной величины равновесной растворимости водорода в палладии ( $n_0 = f(P_{\text{H}_2})$ ).

На рисунке 2 представлены уже обсуждавшиеся выше функции  $y_{\text{max}} = f(P_{\text{H}_2})$  (кривая 1) и функция  $n_0 = f(P_{\text{H}_2})$ , построенная по данным представленным в таблице (колонка 8). Из рисунка 2 следует, что наше предположение вполне оправдалось. Наглядно видна однотипность зависимостей  $y_{\text{max}}$  и  $n_0$  от давления водорода, имеющая место в пределах наших экспериментальных условий.

На рисунке 3 представлены результаты анализа взаимосвязи экспериментально измеренного максимального изгиба пластины — главной характеристики явления формоизменения пластины, индуцированного водородом, и равновесной растворимости водорода в палладии — фундаментального свойства системы палладий–водород.

Однозначность такой взаимосвязи вполне очевидна (рис. 3) и можно утверждать, что в явлении индуцированного водородом формоизменения палладиевой пластины работает функциональная связь  $y_{\text{max}} = f(n_0)$ . В пределах наших экспериментальных условий в каждой из физически существенно различных областей твердого рас-



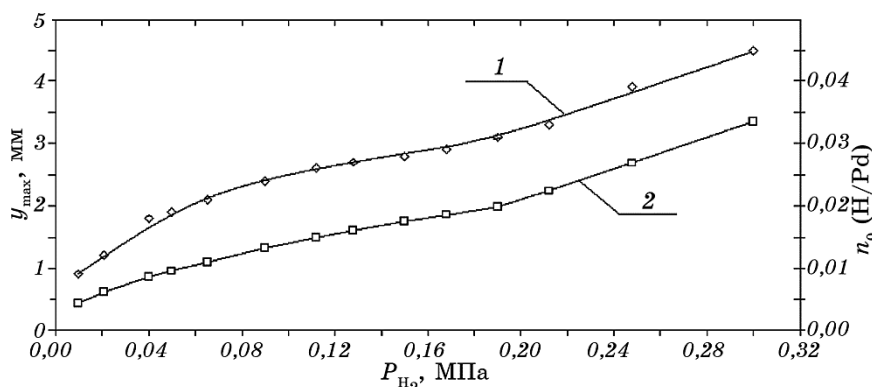


Рис. 2. Зависимость от давления водорода максимальной стрелы прогиба пластины (1) и равновесной растворимости водорода в палладии (2) при 320°C.

творя водорода в палладии (область неидеальных (I), псевдоидеальных (II) и идеальных (III) растворов Pd–H на рис. 3) можно выделить линейные участки этой единой функциональной зависимости:

$$\text{область I: } y_{max} = 105,08x + 1,0075, \quad R^2 = 0,9932, \quad (2)$$

$$\text{область II: } y_{max} = 106,53x + 0,9715, \quad R^2 = 0,9874, \quad (3)$$

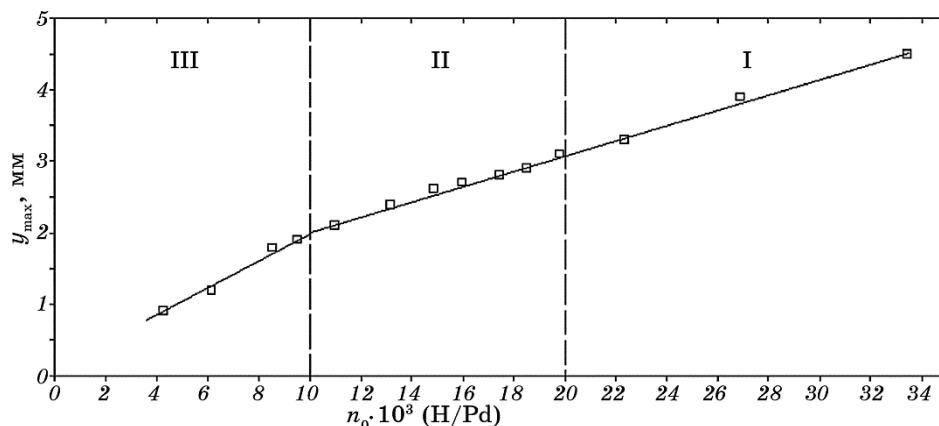
$$\text{область III: } y_{max} = 187,3x + 0,1037, \quad R^2 = 0,9828. \quad (4)$$

В работе впервые экспериментально установлено, что в области малых водородных воздействий зависимость максимального изгиба палладиевой пластины от давления газообразного водорода, подаваемого в рабочую камеру установки, не описывается линейной зависимостью, как это было установлено в работе [1], где пластина при  $T = 240^\circ\text{C}$  подвергалась «сильным» водородным воздействиям от  $P_{H_2} = 0,03$  МПа до 0,43 МПа.

Таким образом воздействие водорода на палладиевую пластину при данной температуре можно считать «сильным», если давление подаваемого к пластине водорода соответствует таким его значениям, при которых в результате насыщения водородом в палладии образуется неидеальный твердый раствор водорода ( $n_0 \geq 0,02$ ) при таких давлениях максимальный изгиб пластины является линейной функцией  $P_{H_2}$  [1].

Воздействие водорода можно считать «малым», если давление водорода уменьшено до таких значений, которые соответствуют образованию идеальных твердых растворов водорода в палладии ( $n_0 \leq 0,01$ ). В этих случаях функция  $y_{max} = f(P_{H_2})$  является сильно нелинейной (см. рис. 2) и ее нелинейность усиливается при уменьшении давления водорода.

В промежуточной области ( $0,01 < n_0 < 0,02$ ) имеет место корневая зависимость прироста равновесной растворимости водорода от при-



**Рис. 3.** Функциональная связь максимального изгиба палладиевой пластины ( $y_{\max}$ ) и равновесной растворимости водорода в палладии ( $n_0$ ) в интервале давлений водорода от  $P_{\text{H}_2} = 0,3$  МПа до  $P_{\text{H}_2} = 0,01$  МПа при  $T = 320^\circ\text{C} = \text{const}$ . I, II, III — соответственно области неидеального, псевдоидеального и идеального твердого раствора водорода в палладии.

роста давления водорода [1], что позволило Лазеру [8] идентифицировать твердые растворы водорода в палладии в промежуточной области как переходные, т.е. псевдоидеальные. Из результатов нашей работы следует, что с точки зрения явления индуцированного водородом формоизменения палладиевой пластины, водородные воздействия соответствующие этой области, оказываются также промежуточными, но все же по своим результатам они оказываются ближе к «сильным» водородным воздействиям (см. рис. 3).

Итак, физическая новизна настоящей работы состоит в том, что впервые установлена однозначная корреляционная связь величины достигаемых максимальных изгибов и равновесной растворимости водорода в палладии во всех трех изученных интервалах давлений, соответствующих областям неидеальных, псевдоидеальных и идеальных твердых растворов Pd–H (рис. 3, соответственно область I, II, III). Отсюда следует правомерность представлений, развитых в [1, 2] о том, что концентрация водорода в самолокализованном слое  $\alpha\text{-PdH}_n$  в момент достижения максимального изгиба близка и однотипно связана с равновесной растворимостью водорода (т.е.  $n \leq n_0$ ). В свою очередь равновесная растворимость водорода в палладии функционально связана с зависимостью от давлением газообразного водорода [1]. Такова цепочка взаимосвязанных физических звеньев, ответственных за взаимосвязь  $y_{\max} = f(P_{\text{H}_2})$  и в том числе за экспериментально установленную нелинейность функции  $y_{\max} = f(P_{\text{H}_2})$  в области малых водородных воздействий. Итак, экспериментальные результаты настоящей работы подтверждают физическую обосно-

ванность феноменологической модели явления индуцированного водородом формоизменения металла и наглядно связывают ее с равновесной растворимостью водорода в металле.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Экспериментально изучено формоизменение консольно закреплённой палладиевой пластины размерами  $68 \times 5,5 \times 0,27$  мм (рабочая длина пластины 60 мм) при ее одностороннем насыщении водородом при температуре  $320^\circ\text{C}$  и давлении водорода  $P_{\text{H}_2} = 0,3 - 0,01$  МПа. Подтверждено, что формоизменение пластины развивается в два этапа.

2. Экспериментально установлено, что зависимость величины максимальной стрелы прогиба пластины от давления водорода является нелинейной функцией и ее нелинейность усиливается при переходе от области давлений водорода, вызывающих образование псевдоидеальных растворов Pd–H ( $0,01 < n_0 < 0,02$ ), к области значений  $P_{\text{H}_2}$ , соответствующих идеальным растворам Pd–H ( $n_0 \leq 0,01$ ).

3. Впервые установлена корреляционная связь величины достигаемых максимальных изгибов пластины и равновесной растворимости водорода в палладии при всех давлениях, соответствующих областям неидеальных, псевдоидеальных и идеальных твердых растворов водорода в палладии.

4. Экспериментальные результаты работы подтверждают физическую обоснованность феноменологической модели явления индуцированного водородом формоизменения палладиевой пластины, в соответствии с которой изгиб пластины в процессе ее одностороннего насыщения водородом обусловлен тем, что у входной стороны пластины формируется и растет слой самолокализованного упруго-напряженного градиентного сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$  с концентрацией водорода  $n$ , которая соизмерима с равновесной растворимостью водорода  $n_0$  в палладии при данных  $T$  и  $P_{\text{H}_2}$  ( $n \leq n_0$ ).

Авторы статьи считают своим приятным долгом поблагодарить проф. В. А. Гольцова за творческое содружество и помощь в обсуждении экспериментальных результатов настоящей работы.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. В. Гольцова, Е. Н. Любименко, *Физика металлов и металловедение*, **112**, № 4: 393 (2011).
2. М. В. Гольцова, Е. Н. Любименко, *Физика металлов и металловедение*, **113**, № 2: 162 (2012).
3. Е. Н. Любименко, М. В. Гольцова, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, № 6: 819 (2011).
4. М. В. Гольцова, Е. Н. Любименко, *Физика металлов и металловедение*,

- 113, № 11: 1073 (2012).
5. Э. Вике, Х. Бродовский, *Водород в металлах* (Москва: Мир: 1981).
  6. V. A. Goltsov, *Progress in Hydrogen Treatment of Materials* (Donetsk: Kassiopereaya Ltd.: 2001).
  7. Е. Н. Любименко, М. В. Гольцова, *Наукові праці ДонНТУ. Металургія*, **177**, № 12 (2010).
  8. R. Laser, *Phys. Rev.*, **29**, No. 8: 2283 (1984).
  9. R. Laser, *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, **34**, No. 2: (1987).
  10. В. А. Гольцов, А. Л. Редько, Ж. Л. Глухова, *Физика металлов и металловедение*, **95**, № 1: 21 (2003).
  11. А. И. Райченко, *Математическая теория диффузии в приложениях* (Киев: Наукова думка: 1981).
  12. П. В. Гельд, Р. А. Рябов, *Водород в металлах и сплавах* (Москва: Metallurgizdat: 1974).

## REFERENCES

1. M. V. Goltsova and E. N. Lyubimenko, *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **112**, No. 4: 393 (2011) (in Russian).
2. M. V. Goltsova and E. N. Lyubimenko, *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **113**, No. 2: 162 (2012) (in Russian).
3. E. N. Lyubimenko and M. V. Goltsova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, No. 6: 819 (2011) (in Russian).
4. M. V. Goltsova and E. N. Lyubimenko, *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **113**, No. 11: 1073 (2012) (in Russian).
5. E. Wicke and H. Brodowsky, *Vodorod v Metallakh* (Moscow: Mir: 1981) (Russian translation).
6. V. A. Goltsov, *Progress in Hydrogen Treatment of Materials* (Donetsk: Kassiopereaya Ltd.: 2001).
7. E. N. Lyubimenko and M. V. Goltsova, *Naukovi Pratsi DonNTU. Metalurhiya*, **177**, No. 12 (2010) (in Russian).
8. R. Laser, *Phys. Rev.*, **29**, No. 8: 2283 (1984).
9. R. Laser, *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, **34**, No. 2: (1987).
10. V. A. Goltsov, A. L. Redko, and Zh. L. Glukhova, *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **95**, No. 1: 21 (2003) (in Russian).
11. A. I. Raychenko, *Matematicheskaya Teoriya Diffuzii v Prilozheniyakh* (Kiev: Naukova Dumka: 1981) (in Russian).
12. P. V. Geld and R. A. Ryabov, *Vodorod v Metallakh i Splavakh* (Moscow: Metallurgizdat: 1974) (in Russian).